



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral - PPGEM



SELEÇÃO DE CAMINHÕES RODOVIÁRIOS PARA MINERAÇÃO UTILIZANDO A METODOLOGIA DE AUXÍLIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO. ESTUDO DE CASO: MINERAÇÃO DE BAUXITA

Autor: **Wilson Trigueiro de Sousa Júnior**

Orientadores: **Prof. Dr. Marcone Jamilson Freitas Souza**
Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Lavra de Minas.

AGRADECIMENTOS

À meu orientador, Prof. Dr. Marcene Jamilson Freitas Souza, pelo apoio, incentivo, dedicação e por ter acreditado no trabalho.

Ao Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral, pela orientação complementar e revisão do texto.

À Prof^a. Dr^a. Milena Estanislau Diniz, pelas orientações e revisões referente à metodologia de análise multicritério de decisão.

Aos meus pais Wilson Trigueiro de Sousa e Maria José Ferro de Sousa, pelo apoio incondicional para a formação da minha pessoa e à minha irmã Carolina, pela ajuda na caminhada de crescimento, sempre com um ponto de vista novo sobre temas antigos.

A equipe de gestão e administração da empresa logística, foco do estudo de caso.

Aos demais professores, funcionários e amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto.

Ao CNPq por ter financiado a pesquisa.

S725s

Sousa Júnior, Wilson Trigueiro de.

Seleção de caminhões rodoviários para mineração utilizando a metodologia de auxílio multicritério à decisão [manuscrito] : estudo de caso - Mineração de bauxita / Wilson Trigueiro de Sousa Júnior – 2012.

x, 146 f.: il.; grafs. ; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Marcene Jamilson Freitas Souza.

Co-orientador: Prof. Dr. Ivo Ever Cabral.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Lavra de Minas.

1. Minas e mineração - Equipamentos - Teses. 2. Circuitos integrados - AMD - Teses. 3. Lavra a céu aberto - Teses. 4. Bauxita - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. II. Título.

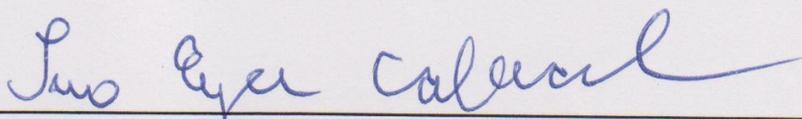
CDU: 622.6:004.31

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

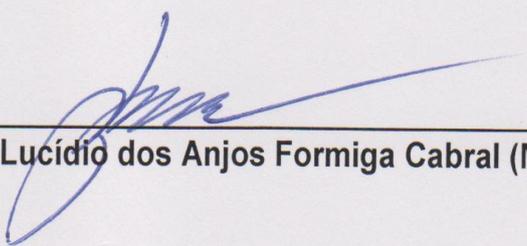
**“SELEÇÃO DE CAMINHÕES RODOVIÁRIOS PARA MINERAÇÃO
UTILIZANDO A METODOLOGIA DE AUXÍLIO MULTICRITÉRIO
À DECISÃO. ESTUDO DE CASO: MINERAÇÃO DE BAUXITA”**

AUTOR: WILSON TRIGUEIRO DE SOUSA JUNIOR

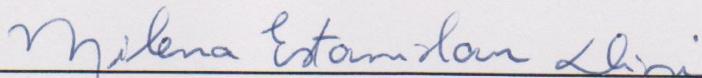
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 22 de junho de 2012, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



• Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral (Orientador) – UFOP



• Prof. Dr. Lucídio dos Anjos Formiga Cabral (Membro) – UFPB



• Prof.^a Dr.^a Milena Estanislau Diniz (Membro) – UFOP

RESUMO

Em todos os empreendimentos minerários, um fator que merece estudos econômicos prévios são os custos de transporte relacionados ao empreendimento, sejam estes custos logísticos internos ou externos, acarretando grande peso no lucro líquido. Assim, se faz muito importante nas fases de aquisição ou substituição de frotas de transporte, estudos de viabilidade econômica para se determinar a melhor combinação de equipamentos de carga e transporte (interno/externo) que atendam às demandas de produção com um menor custo, avaliando as alternativas existentes para aquisição no mercado. O presente trabalho utilizou um estudo de caso de seleção de caminhões rodoviários para o transporte do ROM (*run of mine*) em uma mineradora de bauxita do Estado de Minas Gerais, utilizando-se da metodologia de auxílio multicritério à decisão (MCDA em inglês ou AMD em português). Durante o estudo de caso três questões chaves foram selecionadas, respondendo às principais incertezas para a aquisição de equipamentos: qual modelo comprar, qual a quantidade mínima a ser adquirida e por quanto tempo permanecer com o equipamento. Para responder a primeira pergunta percebeu-se que, no estudo de caso, a diferença financeira entre as alternativas avaliadas não justificava a aquisição de uma em relação à outra. Foi constatado que a resposta às duas últimas perguntas deve ser realizada com cálculos e análises quantitativas, considerando-se dados financeiros. Assim, fatores qualitativos deveriam ser considerados no processo de decisão. Partindo da premissa de igual poder de escolha das alternativas, a utilização do AMD possibilitou a quantificação de dados qualitativos no processo de tomada de decisão. Com esse propósito, foi criada uma metodologia capaz de ser adaptada para atender a novos processos de aquisição/substituição de equipamentos em empresas mineradoras, considerando a possibilidade de se utilizar e especificar fatores importantes e subjetivos durante o processo de decisão da seleção desses equipamentos.

Palavras-chave: seleção de equipamentos, AMD, mineração, lavra a céu aberto, bauxita.

ABSTRACT

In all mining projects, a factor that deserves previous economic studies are the transportation costs related to the enterprise, whether internal or external logistics costs results in a large weight in the net profit. So it is very important at the phase of acquisition or replacement of transportation fleets, the economic feasibility studies. Through these studies it is possible to have the best loading and hauling equipment combination (internal/external) to meet production demands with lower costs, evaluating the alternatives available for purchase in the market. This study focused the case of selection highway trucks to transport the ROM (run of mine) in a bauxite mining company, located in the region of Minas Gerais State, Brazil, using the multicriteria decision aid methodology (MCDA in English or AMD in Portuguese) being this area of knowledge related to operational research. During the case study three methodological key questions were selected, answering the main questions of acquisition equipment: which model to buy, which is the minimum amount to be purchased and how long to stay operating the fleet units. During the study, it was imperative that to answer the two last questions should be used calculus and quantitative analysis side by side financial data. To answer the first question it was noticed that the financial difference between the alternatives do not justify the acquisition of one alternative upon another. That way, qualitative criteria should be considered at the decision process. Assuming the same power of choice between the alternatives, the use of AMD methodology allows the quantification of qualitative data to the decision process. With this purpose, it was created a methodology able to be adapted to new acquisition/replacement equipment process in the mining industry and considering the possibility of using and specifying important subjective factors to the decision making equipment selection process.

Key-words: equipment selection, MCDA, mining, open pit mining, bauxite.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1: Ciclo básico de operações unitárias de carga e transporte | 26 |
| Figura 2: Inclinação e manutenção da estrada..... | 31 |
| Figura 3: Itens para operação com segurança..... | 31 |
| Figura 4: Equipamentos de desmonte, carregamento e transporte | 33 |
| Figura 5: Dimensões de uma escavadeira de rodas | 34 |
| Figura 6: Dimensões de um caminhão fora-de-estrada | 34 |
| Figura 7: Uso de retro escavadeira em cima de bancada..... | 35 |
| Figura 8: Dragline em operação | 36 |
| Figura 9: Bucket Wheel em operação em conjunto com transportador de correia..... | 36 |
| Figura 10: Transportador de correia | 37 |
| Figura 11: Esquema de um método AMD genérico | 51 |
| Figura 12: Comparação entre ACV e AMD | 63 |
| Figura 13: Estrutura hierárquica do problema de seleção de caminhões rodoviários adaptados para mineração..... | 76 |
| Figura 14: Estrutura hierárquica genérica para seleção de equipamentos..... | 85 |
| Figura 15: Grafo da relação de superação do estudo de caso | 111 |
| Figura 16: Pré-ordem total para o estudo de caso | 115 |
| Figura 17: Análise de sensibilidade dos subcritérios..... | 116 |
| Figura 18: Análise de sensibilidade dos critérios | 118 |
| Figura 19: Gráfico da análise de sensibilidade dos julgamentos..... | 119 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1: Comparação das diferentes etapas de estimação de custos | 12 |
| Tabela 2: Ciclo de operações de uma mina a céu aberto genérica | 25 |
| Tabela 3: Exemplo de configurações possíveis | 39 |
| Tabela 4: Métodos básicos na seleção de projetos | 41 |
| Tabela 5: Dados da empresa foco do estudo de caso | 70 |
| Tabela 6: Sistemas de tração / locomoção disponíveis no mercado | 72 |
| Tabela 7: Função objetivo do problema de seleção de caminhões rodoviários adaptados para mineração..... | 77 |
| Tabela 8: Avaliação das alternativas V1, V2 e V3..... | 78 |
| Tabela 9: Escala fundamental de Saaty (1980) | 86 |
| Tabela 10: Comparações paritárias entre alternativas para cada critério | 86 |
| Tabela 11: Exemplo de matriz de julgamentos genérica..... | 87 |
| Tabela 12: Escala natural de Lootsma | 89 |
| Tabela 13: Matriz de julgamento das alternativas à luz do subcritério EEA | 93 |
| Tabela 14: Matriz normalizada para o subcritério EEA | 94 |
| Tabela 15: PML dos subcritérios..... | 95 |
| Tabela 16: Matriz auxiliar para cálculo | 98 |
| Tabela 17: Índices randômicos de consistência (IR)..... | 99 |
| Tabela 18: Valores para cálculo da RC | 99 |
| Tabela 19: Critérios e alternativas do estudo de caso..... | 101 |
| Tabela 20: Sistema fundamental de relações de preferências | 103 |
| Tabela 21: Situações de combinações de preferências..... | 104 |
| Tabela 22: Versões dos métodos da família Electre..... | 105 |
| Tabela 23: Tipos de critério e funções de preferência..... | 107 |
| Tabela 24: Desempenho normalizado das alternativas para os critérios e pesos | 108 |
| Tabela 25: Construção das relações de superação | 111 |
| Tabela 26: Tabela resumo do estudo de caso | 112 |
| Tabela 27: Resultado das funções de preferência..... | 113 |
| Tabela 28: Fluxos de superação positivo e negativo | 114 |
| Tabela 29: Resultados gerados para os diferentes pesos dos subcritérios do AHP-WPM..... | 116 |
| Tabela 30: Resultados gerados para os diferentes pesos dos critérios do AHP-WPM..... | 117 |
| Tabela 31: Análise de sensibilidade dos julgamentos | 119 |
| Tabela 32: Análise de sensibilidade do Electre I..... | 121 |
| Tabela 33: Análise de sensibilidade do Prométhée II | 122 |
| Tabela 34: Matriz normalizada para o subcritério EEA | 140 |
| Tabela 35: Matriz normalizada para o subcritério EOE | 140 |
| Tabela 36: Matriz normalizada para o subcritério ADN | 141 |
| Tabela 37: Matriz normalizada para o subcritério PMD | 141 |
| Tabela 38: Matriz normalizada para o subcritério FVU | 142 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 39: Matriz normalizada para o subcritério DAM | 142 |
| Tabela 40: Matriz normalizada para o subcritério IDA..... | 143 |
| Tabela 41: Matriz normalizada para o subcritério GEN | 143 |
| Tabela 42: Matriz normalizada para o subcritério GES | 144 |
| Tabela 43: Matriz normalizada para o subcritério GDA | 144 |
| Tabela 44: Matriz normalizada para o subcritério VAT | 145 |
| Tabela 45: Matriz normalizada para o subcritério FDF | 145 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|-------------|---|
| ACV - | Avaliação do Ciclo de Vida |
| ADN - | Adaptação ao Novo |
| AHP - | <i>Analytic Hierarchic Process</i> - Processo de Análise Hierárquica |
| AMD - | Auxílio Multicritério à Decisão |
| ANP - | <i>Analytic Network Process</i> - Processo de Análise em Rede |
| BWE - | <i>Bucket Wheel Excavator</i> – Retomadora de Caçamba |
| CA - | Custos de Aquisição |
| CAPES - | Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior |
| DAM - | Distância até a Mina |
| DMT - | Distância Média de Transporte |
| DNPM - | Departamento Nacional de Produção Mineral |
| DST - | <i>Dialectical System Theory</i> - Teoria do Sistema Dialético |
| EEA - | Experiência do Equipamento Atual |
| ELECTRE - | <i>Elimination et Choix Traduisant la Réalité</i> - Eliminação e Escolha Tradusindo a Realidade |
| EOE - | Experiência de Outras Empresas |
| ERP | <i>Enterprise Resource Planning</i> – Planejamento de Recursos da Empresa |
| FDL - | Facilidades de Financiamento |
| FIPE - | Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas |
| FMCDA - | <i>Fuzzy Multicriteria Analysis Method</i> – Método de Análise Multicritério Nebuloso |
| FO - | Função Objetivo |
| FVU - | Facilidade de Venda do Usado |
| GAIA - | <i>Geometrical Analysis for Interactive Aid</i> – Análise Geométrica para Auxílio Interativo |
| GDA - | Garantia da Autorizada |
| GEN - | Garantia do Equipamento Novo |
| GES - | Garantia Estendida ou Seguro |
| GR - | Garantias |
| IC - | Índice de Consistência |
| IDA - | Instalações da Autorizada |
| IDS - | <i>Intelligent Decision System</i> – Sistema de Decisão Inteligente |
| IR - | Índice Randômico de Consistência |
| LC - | Limite de Concordância |
| LD - | Limite de Discordância |
| LHD - | <i>Loud Haul Dump</i> – Carregar Transportar Descarregar <i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation</i> |
| MACHBETH - | <i>Technique</i> – Medida de Atratividade através de Técnica de Avaliação de Base Categórica |
| MAUT - | <i>Multi Atribut Utility Teory</i> – Teoria da Utilidade Multi Atributo |
| MCDA - | <i>Multi-Criteria Decision Aid</i> - Auxílio Multicritério à Decisão |
| MMC - | Mínimo Múltiplo Comum |
| NBR - | Norma Brasileira |
| PF - | Prestígio do Fabricante |
| PG - | Prioridades Globais |
| PMD - | Percentual Médio de Desvalorização |
| PML - | Prioridades Médias Locais |
| PROMÉTHÉE - | <i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations</i> |

| | |
|---------------|--|
| PVF's - | Pontos de Vista Fundamentais |
| RC - | Razão de Consistência |
| ROM - | <i>Run of Mine</i> |
| RV - | Revenda |
| SA - | Serviço Autorizado |
| SMAA - | <i>Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis</i> – Análise de Aceitabilidade Estocástica Multicritério |
| SMART - | <i>Simple Multiattribute Rating Technique</i> – Técnica de Ordenação Multiatributo Simples |
| SSD - | Sistemas de Suporte à Decisão |
| SSMS - | <i>Supplier Selection and Management System</i> – Sistema de Seleção e Gerenciamento de Fornecedores |
| SWOT - | <i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats</i> – Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças |
| TIR - | Taxa Interna de Retorno |
| t - | Tonelada |
| UFOP - | Universidade Federal de Ouro Preto |
| V1, V2 e V3 - | Veículo 1, Veículo 2 e Veículo 3 |
| VAE - | Valor Anual Equivalente |
| VAT - | Valor de Aquisição do Ativo |
| VPL - | Valor Presente Líquido |
| WPM - | <i>Weighted Product Model</i> - Modelo do Produto dos Pesos |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Fundamentos de Planejamento de Mina..... | 1 |
| 1.2 O Processo de Tomada de Decisão..... | 2 |
| 1.3 OBJETIVOS..... | 6 |
| 1.3.1 Objetivo Geral..... | 6 |
| 1.3.2 Objetivo Específico..... | 6 |
| 1.4 JUSTIFICATIVA..... | 7 |
| 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO..... | 8 |
| 2 METODOLOGIA..... | 9 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 10 |
| 3.1 Introdução..... | 10 |
| 3.2 Tipos de estimação de custos..... | 10 |
| 3.3.1 Método da mesa redonda..... | 15 |
| 3.3.2 Método do índice de faturamento..... | 15 |
| 3.3.3 Método do custo unitário ou investimento..... | 16 |
| 3.3.4 Método do ajuste exponencial da capacidade..... | 16 |
| 3.3.5 Custos de equipamentos..... | 17 |
| 3.3.6 Método do índice de custo..... | 18 |
| 3.3.7 Método do índice de custo dos equipamentos..... | 18 |
| 3.3.8 Método do índice de custos de componentes..... | 19 |
| 3.3.9 Estimação detalhada..... | 19 |
| 3.3.10 Imprevistos..... | 20 |
| 3.3.11 Engenharia..... | 20 |
| 3.3.12 Estimação dos custos de operação..... | 21 |
| 3.3.12.1 Custos diretos..... | 21 |
| 3.3.12.2 Custos Indiretos..... | 22 |
| 3.3.12.3 Custos Gerais..... | 23 |
| 3.4 Tarefas básicas no ciclo de produção..... | 24 |
| 3.5 Dimensionamento e seleção dos equipamentos principais de carga e transporte..... | 27 |
| 3.5.1 Dimensionamento dos equipamentos principais de carga e transporte..... | 27 |
| 3.5.1.1 Compatibilidade do porte dos equipamentos..... | 32 |
| 3.5.2 Seleção de equipamentos de carga e transporte..... | 38 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.6 | Discussão sobre a aplicação da metodologia AMD | 44 |
| 3.7 | Revisão e classificação dos artigos consultados sobre o AMD..... | 45 |
| 3.7.1 | Fundamentação teórica e axiomas do AMD nos níveis de abordagem, metodologia e métodos utilizados | 46 |
| 3.7.2 | Validação conceitual e operacional do uso do AMD em problemas reais | 52 |
| 3.7.3 | Utilização do AMD na mineração | 63 |
| 4 | ESTUDO DE CASO: DEFINIÇÃO DO PROBLEMA ABORDADO | 67 |
| 4.1 | O problema de aquisição / substituição de equipamentos | 67 |
| 4.2 | Estudo de caso | 68 |
| 4.3 | Atividades realizadas..... | 69 |
| 4.3.1 | Aquisição e análise de dados | 69 |
| 4.3.1.1 | Primeira fase: Dados da empresa | 70 |
| 4.3.1.2 | Segunda fase: Análise do cenário..... | 71 |
| 4.3.1.3 | Terceira fase: Criação do modelo de avaliação | 74 |
| 5 | APLICAÇÃO DO AMD NA SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE MINERAÇÃO | 80 |
| 5.1 | Principais métodos multicritério..... | 80 |
| 5.1.1 | Métodos da Escola Americana | 81 |
| 5.1.1.1 | Método de análise hierárquica clássico (AHP-Clássico)..... | 84 |
| 5.1.1.2 | Método AHP multiplicativo | 89 |
| 5.1.1.3 | Método MACBETH | 90 |
| 5.1.1.4 | Métodos AHP referenciado, AHP B-G e outros..... | 91 |
| 5.1.2 | Aplicação do AHP no estudo de caso..... | 91 |
| 5.1.2.1 | Aplicação do AHP-Clássico na seleção de equipamentos de mineração | 92 |
| 5.1.2.2 | Análise de consistência..... | 97 |
| 5.1.2.3 | Aplicação do AHP-WPM na seleção de equipamentos de mineração | 100 |
| 5.1.3 | Métodos da Escola Francesa..... | 102 |
| 5.1.3.1 | Família Electre..... | 102 |
| 5.1.3.2 | Família Prométhée..... | 105 |
| 5.1.4 | Aplicação do Electre no estudo de caso | 108 |
| 5.1.5 | Aplicação do Prometheé no estudo de caso..... | 112 |
| 5.2 | Análise de sensibilidade | 115 |
| 5.2.1 | Análise de sensibilidade do AHP-WPM | 115 |
| 5.2.2 | Análise de sensibilidade do Electre I..... | 120 |

| | |
|---|-----|
| 7.2.3 Análise de sensibilidade do Promeéthé II..... | 121 |
| 7.3 Conclusões sobre a AMD aplicada no estudo de caso | 122 |
| 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 124 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 130 |
| ANEXO I - DETERMINAÇÃO DO PERÍODO ÓTIMO PARA TROCA DE ATIVO | 139 |
| ANEXO II - MEMORIAL DE CÁLCULO DO AHP-WPM..... | 140 |

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é dada uma visão geral dos princípios básicos que norteiam a mineração no que tange aos requisitos para a avaliação de projetos de mineração, desde o início dos estudos de viabilidade até a exploração¹ da mina.

1.1 Fundamentos de Planejamento de Mina

De acordo com Hartman e Mutmanský (2002), a mineração pode ser considerada, juntamente com a agricultura, um dos primeiros esforços da humanidade para a retirada da natureza de bens que podem ser aproveitados para o bem estar de nossa civilização. Ou seja, a agricultura e a mineração (incluindo a produção de óleo e gás natural) continuam sendo os setores responsáveis pelo suprimento de recursos usados pela sociedade moderna para a sua sobrevivência.

Ainda segundo os mesmos autores, esta propriedade de gerar recursos para as sociedades que as exploram é ainda, em nossa sociedade moderna, uma forma de gerar riquezas para quem as possui, diferenciando os países ricos e pobres, na medida em que melhores técnicas são desenvolvidas para a utilização destes recursos.

Para o melhor entendimento do engenheiro, que pretende atuar nessa área do conhecimento são importantes os estudos das etapas que precedem, e dão suporte para a exploração da reserva mineral. Com o intuito de melhor entender a “vida” de um empreendimento mineral, a literatura técnica a divide nas seguintes fases:

- 1) Prospecção: É a fase em que se pretende determinar as regiões mais favoráveis de ocorrência de depósitos minerais com valor comercial. É nesta fase que são feitas as análises geológicas, geofísicas, foto-interpretação de imagens de satélites, entre outros.

¹ Entende-se por exploração o ato de retirada do minério com teor econômico viável e exploração as fases de pesquisa da jazida.

- 2) Exploração: Nesta fase, após a determinação da localização mais provável da jazida², é que se determina sua forma, extensão e teor de minério contido, para se analisar a viabilidade econômica de se explorar essa jazida ou não. Caso a decisão seja favorável à exploração, é determinado o método de lavra a ser adotado (a céu aberto ou subterrâneo).
- 3) Desenvolvimento: Após a determinação da viabilidade econômica e decisão favorável à exploração, é nesta fase que ocorre a implantação de infraestruturas, como estradas, escritórios, oficinas, almoxarifados, retirada do decapeamento, assim como a obtenção de licenças para a exploração.
- 4) Exploração: Com a infraestrutura implantada e as frotas de equipamentos adquiridos, inicia-se a lavra do minério e seu posterior beneficiamento³.
- 5) Descomissionamento: Existem leis ambientais que tratam sobre a recuperação das áreas degradadas pela exploração mineral, ao término da exploração e fim das reservas economicamente lavráveis. (É nesta fase que ocorre o fechamento legal da mina).

A presente dissertação tem seu foco na fase de exploração, em que é determinado o método de lavra a ser empregado, e, por consequência, a definição de quais equipamentos deverão ser adquiridos para a produção. Na literatura técnica de mineração, a área de seleção de equipamentos é pouco abordada. No intuito de criar uma metodologia de apoio à tomada de decisão, alguns métodos são avaliados neste estudo, para aplicação à seleção de equipamentos.

1.2 O Processo de Tomada de Decisão

Segundo Gomes *et al.* (2009a), um processo de decisão envolve a escolha entre, no mínimo, duas alternativas para a solução de um problema⁴ que terá consequências para o

² Jazida é uma região terrestre definida que possui elevada concentração de um elemento interessante economicamente.

³ Beneficiamento significa a retirada ou diminuição da concentração de elementos que não possuem valor econômico para o comprador.

⁴ Parte-se do princípio que se pode ou não tomar uma decisão.

futuro, podendo ser: imediato, de curto prazo, longo prazo ou a combinação entre as anteriores.

Para a tomada de decisão, a análise de cenários se faz necessária para avaliação de alternativas possíveis de serem implementadas de acordo com diferentes estratégias envolvidas na decorrência de sua aplicação. Como a elaboração de estratégias é, em sua essência, um processo que envolve consequências em várias áreas, elas devem ser avaliadas em diferentes e complexas áreas, tais como: tecnologias, humanas, sociais, econômicas, jurídicas, políticas e institucionais, que muitas vezes tratam de fatores tanto qualitativos (que dependem do julgamento do decisor) quanto quantitativos (que podem ser expressos em unidades de medida monetária, peso, entre outros) (GOMES *et al.*, 2009a).

Devido ao fato da repercussão das decisões tomadas em cenários complexos serem de grande importância para o futuro de instituições, sejam elas públicas ou privadas, as pessoas envolvidas, ou os agentes decisores⁵, devem estar completamente envolvidos com o problema ou serem parte importante para a solução do mesmo. A importância do agente decisor, muitas vezes, é atribuída às suas experiências em processo de decisão anteriores.

A análise de tomada de decisão fornece meios que ajudam as pessoas a entender melhor a respeito de como tomam decisões, tornando assim mais claras as escolhas das alternativas para o agente decisor e de todos aqueles que são direta e indiretamente envolvidos em tal escolha. O processo de decisão visa a ajudar a todos os envolvidos para esclarecer os quesitos que são inerentes a todo ser humano e podem afetar o seu julgamento. Entre os principais fatores que afetam a capacidade cognitiva, pode-se citar, de acordo com Kaufman (1999) *apud* Gomes *et al.* (2009a):

- A. capacidade limitada de processamento do cérebro humano;
- B. desconhecimento de todas as alternativas possíveis de resolver um problema;
- C. influência de aspectos emocionais e afetivos.

Segundo Gomes *et al.* (2009a), pode-se definir teoria da decisão como sendo o “conjunto de procedimentos e métodos de análise que procuram assegurar a coerência, a eficiência, e a eficácia das decisões tomadas...”. Dentre as etapas principais para a tomada de decisão pode-se ressaltar:

⁵ Entende-se por agente decisor o facilitador ou analista com poder de influenciar a decisão.

- A. análise e identificação da situação e do problema;
- B. desenvolvimento de alternativas;
- C. comparação entre alternativas;
- D. classificação dos riscos de cada alternativa;
- E. escolha da melhor alternativa;
- F. execução e avaliação.

Na maioria dos casos, os processos de tomada de decisão têm como referencial os custos e ganhos monetários das alternativas avaliadas. À medida que as alternativas e suas consequências envolvem um maior grupo de pessoas, muitos são os casos em que somente o custo não é o fator de decisão. Nos casos de decisões tomadas em cenários complexos, se faz útil a avaliação do uso de técnicas qualitativas, que avaliam outros ganhos subjetivos e importantes. Dentre as técnicas mais empregadas, pode-se citar (GOMES *et al.*, 2009a):

1. *brainstorm* (tempestade de ideias);
2. matriz de prioridade;
3. diagrama de espinha de peixe;
4. árvore de decisão ou diagrama de árvore;
5. mapas cognitivos;
6. técnica “P-N-I”;
7. análise do campo de forças;
8. técnica nominal de grupo;
9. método Delphi;
10. técnicas de grupo (diálogo ou debate público, discussão em painel, mesa-redonda, painel com interrogadores, direção de conferência, fórum, simpósio, entre outros).

Apesar da maioria das técnicas e métodos citados serem amplamente empregados em várias circunstâncias e com níveis de sucesso satisfatório, a análise multicritério de auxílio à tomada de decisão, conhecida pelo acrônimo AMD em português e MCDA em inglês, foi avaliada e empregada neste trabalho.

Os primeiros métodos de auxílio à tomada de decisão, criados por Thomas L. Saaty, a partir de 1970, eram voltados à análise de problemas com as seguintes características:

- A) pelo menos dois critérios de resolução do problema conflitantes entre si;
- B) critérios e alternativas de solução não claramente definidos, assim como não claramente compreendidas as consequências da escolha de cada alternativa com relação a pelo menos um critério;
- C) critérios e alternativas ligados, de tal forma que um critério parece refletir parcialmente o outro. A eficácia da escolha de uma alternativa depende de outra alternativa ter sido ou não também escolhida, no caso em que as alternativas não são mutuamente exclusivas, diferenciando as alternativas e critérios de acordo com o julgamento do agente decisor;
- D) solução dos problemas dependente de um conjunto de pessoas, cada uma das quais com seu próprio ponto de vista, muitas vezes conflitantes com os demais;
- E) restrições do problema não bem definidas, podendo mesmo haver alguma dúvida a respeito do que é critério e do que é restrição;
- F) existência de alguns critérios quantificáveis, ao passo que outros só o são por meio de julgamento de valores efetuados sobre uma escala;
- G) utilização de uma escala para um dado critério, podendo ser cardinal, verbal ou ordinal, dependendo dos dados disponíveis e da própria natureza dos critérios.

Várias outras complicações podem surgir num problema real de tomada de decisão, mas estes sete aspectos anteriores caracterizam a complexidade de tal problema. Em geral, problemas dessa natureza são considerados mal estruturados.

Os problemas que possuem uma ou mais das sete características apresentadas anteriormente, são o foco dos métodos multicritérios de apoio à decisão. Esses métodos visam criar uma estrutura de apoio para o agente ou grupo de agentes decisores terem melhores condições de entender os aspectos e fatores críticos que permeiam a resolução do problema tratado, aceitando não apenas uma solução como válida, mas criando estruturas de preferências que permitam representações explícitas em vez de representações numéricas artificiais (GOMES *et al.*, 2009a).

A análise dos principais métodos multicritérios, assim como as suas aplicações, é parte deste trabalho, para que seja escolhida a melhor metodologia ou um grupo de metodologias a serem empregadas na seleção de equipamentos, em especial, na seleção de caminhões rodoviários adaptados para a mineração de bauxita.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo geral propor a criação de uma metodologia de seleção de caminhões rodoviários capacitados para a operação em condições de mineração, que atendam as questões-chave para a solução do problema. Essa metodologia poderá proporcionar aos gestores (agentes tomadores de decisão), uma alternativa de ferramenta que os ajudem no processo de tomada de decisão, de tal modo que lhes seja possível analisar as alternativas sob uma ótica mais criteriosa envolvendo questões tanto qualitativas quanto quantitativas.

1.3.2 Objetivo Específico

São objetivos específicos deste trabalho:

- Estudar o problema de aquisição / substituição de equipamentos com base na literatura;
- Levantar os fatores que contribuem para a substituição de equipamentos;
- Levantar e analisar os dados referentes às condições de operação;
- Avaliar as características dos equipamentos atuais;
- Avaliar no mercado os modelos de caminhões capazes de operar em condições de mineração;
- Realizar uma revisão sobre as melhores práticas registradas na literatura para a seleção de equipamentos para mineração, com foco especial no que se refere aos equipamentos de transporte do ROM⁶;
- Analisar a literatura sobre a ferramenta de auxílio multicritério à decisão (AMD) para a avaliação de alternativas no que se refere à aquisição de equipamentos para a

⁶*Run of mine*: É o minério produzido nas frentes de lavra e transportado para o britador primário ou pilha intermediária.

mineração, visto que, de conhecimento, a ferramenta não é empregada de maneira formal nas empresas dessa área;

- Realizar um estudo de caso empregando, em parte, a metodologia clássica e o AMD, gerando a nova metodologia proposta;
- Disseminar as ferramentas (em especial o AMD) para a tomada de decisões em projetos de mineração, ajudando o agente decisor a avaliar suas alternativas de acordo com critérios econômicos e qualitativos específicos de seu empreendimento com a ajuda de uma ferramenta apropriada;

1.4 JUSTIFICATIVA

Com base no fator escala associado às minerações de grande porte (como as minas produtoras de minério de ferro em grande volume), esta mesma metodologia de seleção de equipamentos não se faz totalmente aplicável em minerações de pequeno porte, que não possuem demanda de produção e nem recursos financeiros que justifiquem a aquisição de equipamentos de grande capacidade de produção (a exemplo de caminhões fora-de-estrada). Essa proposta se justifica devido ao fato de existir, na literatura, uma metodologia de dimensionamento e seleção já ultrapassada (com mais de 20 anos) e que não comporta as especificidades atuais dos empreendimentos de mineração, com exigências mercadológicas que pregam invariavelmente a redução de custos e contratos com margens de lucro mais restritos.

Com o avanço tecnológico e investimentos de várias empresas fornecedoras de insumos e serviços para a mineração, hoje existe a disponibilidade de uma vasta gama de equipamentos para mineração que possuem características muito próximas em vários aspectos, tanto de custos quanto de operação e manutenção. Essa diversidade de conjuntos técnicos é um fator complicador para a seleção dos equipamentos mais adequados, corroborando para a criação de uma metodologia de seleção destes, amparada tecnicamente.

Este trabalho também espera contribuir com a minimização dos custos com transporte, ao influenciar no processo de seleção dos equipamentos mais adequados. Isto se deve ao

grande impacto no custo final do minério vendido decorrente do custo de transporte associados ao método de carregamento e transporte (LOPES, 2010).

Com a utilização da metodologia de análise multicritério à decisão é esperado a disseminação dessa ferramenta para que possa ser utilizada em conjunto com índices econômicos quando os mesmos não são suficientes para se eleger uma alternativa, segundo o ponto de vista do agente decisor.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O restante deste trabalho está organizado como se segue. No capítulo 2, é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho. No capítulo 3, é feita uma revisão da literatura sobre os principais conceitos envolvidos no dimensionamento de frotas de caminhões para mineração. Neste mesmo capítulo, também são comentados artigos sobre a aplicação de métodos AMD em várias áreas do conhecimento, assim como na mineração. No capítulo 4, são abordados os principais fatores que interferem no problema de seleção de caminhões rodoviários para mineração, a partir da análise da empresa foco do estudo de caso. No capítulo 5, são apresentados os conceitos das metodologias AMD estudadas, assim como as suas aplicações no estudo de caso. O capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho.

2 METODOLOGIA

Para a tomada de decisões, foi constatado através de pesquisa que pouco foi escrito e desenvolvido a respeito dos critérios e objetivos a serem considerados e avaliados no processo de tomada de decisão para a seleção de equipamentos de mineração. Assim, foram executadas as seguintes atividades para se delimitar, analisar e propor uma metodologia capaz de ajudar a resolver o problema proposto:

1. Revisão de literatura referente aos temas de planejamento e seleção de equipamentos de lavra a céu aberto e metodologias de análise de decisão multicritério. Esta atividade foi realizada por meio de pesquisa em publicações científicas impressas e digitais, presentes nos meios oficiais de publicação, a exemplo de bibliotecas e bancos de dados de editoras científicas, muitas delas presentes no portal governamental CAPES (ex. SciELO, Elsevier, Science Direct, Inter Science, Emerald, Springer, entre outros);
2. Estudo de caso sobre metodologia de aquisição/troca de frota de caminhões rodoviários adaptados para operação em mineração, trabalhando para operador logístico em mina de bauxita em Minas Gerais, no transporte do ROM;
3. Aplicação de uma metodologia para seleção de frota de caminhões rodoviários para operação em mina a céu aberto;
4. Análise e validação dos resultados obtidos para a metodologia de seleção de frota com a utilização de caminhões rodoviários adaptados.

Essas atividades foram desenvolvidas no período de janeiro de 2010 a abril de 2012.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

Segundo Revuelta e Jimeno (1997), a complexidade envolvida e os riscos inerentes à implementação dos projetos de mineração exigem uma rápida e constante avaliação dos resultados esperados nas operações das minas. Este processo cobre desde a avaliação dos projetos em suas etapas de exploração até as suas etapas de construção. A aquisição dos bens de produção, necessários para se colocar em funcionamento uma mina, exigem o desembolso de recursos econômicos que são determinantes na elaboração dos cálculos de viabilidade econômica do empreendimento mineiro a ser avaliado.

Ainda segundo esses autores, os projetos de investimentos em mineração se configuram como sendo fluxos de caixa, que constituem a base de avaliação econômica dos projetos de investimento. Essa avaliação, por sua vez, compõe um conjunto de previsões de produção e preços de mercado referentes a custos, amortizações e impostos. Na medida em que estas previsões sejam mais confiáveis e detalhadas, a avaliação econômica será mais válida e próxima da realidade.

Esta primeira parte do capítulo tem por objetivo relacionar os métodos clássicos da literatura, referentes aos principais custos que interferem na avaliação de um projeto de mineração, e, conseqüentemente, na seleção de equipamentos, assim como os cálculos empregados para tal tarefa.

3.2 Tipos de estimação de custos

De acordo com Revuelta e Jimeno (1997), na etapa de avaliação econômica de um projeto de investimento de mineração, são necessários dados de ordem geológica e de engenharia, de tal forma que os principais fatores determinantes do sucesso de um projeto de mineração sejam levantados. De acordo com Gentry e O'Neil (1979) *apud* Revuelta e Jimeno (1997), podem-se identificar as seguintes etapas básicas para a estimação de custos:

- 1) descoberta da jazida e identificação de seu potencial através da exploração;
- 2) estimacão da ordem de magnitude dos custos para o estudo de viabilidade preliminar;
- 3) programa de pesquisa detalhado, incluindo estudos de amostras obtidas e definicão do processo de tratamento;
- 4) estimacão preliminar dos custos para o estudo de viabilidade;
- 5) desenvolvimento de todos os cálculos necessários para o desenho de engenharia da exploracão e planta de tratamento, incluindo a seleção preliminar de equipamentos;
- 6) estimacão definitiva dos custos para o estudo de viabilidade;
- 7) desenho detalhado da exploracão e da planta, incluindo especificações, diagramas de fluxo, entre outros;
- 8) estimacão detalhada dos custos para o estudo de viabilidade;
- 9) construção da planta e desenvolvimento da exploracão;
- 10) *startup*⁷ e comissionamento⁸;
- 11) produção.

De acordo com a Tabela 1 podemos dividir sete das 11 etapas anteriores em quatro grupos principais de estimacão de custos. Nesta tabela, as duas primeiras colunas indicam o tipo de estimacão e as etapas associadas, respectivamente. A terceira coluna representa a precisão acumulada dos custos totais do empreendimento, por tipo de estimacão. Na quarta coluna é mostrado o tempo necessário para a estimacão. Na quinta coluna mostra-se o percentual de falta de precisão associada a sua respectiva etapa do projeto. Na sexta coluna é apresentado o percentual de engenharia⁹ associado ao nível do projeto. Na última coluna mostra-se o percentual de desembolso financeiro por tipo de estimacão.

⁷*Start up* é o conjunto de todas as atividades ou manobras para se colocar os sistemas em operacão.

⁸ Comissionamento consiste na verificacão, inspecão e teste dos componentes físicos de um projeto de engenharia.

⁹ Por engenharia é entendido o conjunto de projetos elaborados para se administrar um empreendimento mineiro. Mais detalhes são relacionados no item 3.3.11 Engenharia.

Tabela 1: Comparação das diferentes etapas de estimação de custos

| Tipo de estimação associada ao desenvolvimento do projeto | Etapas associadas à estimação | Precisão (%) | Tempo necessário para a estimação | Imprecisão associada (%) | Realização de engenharia (%) | Desembolso de capital (%) |
|--|--------------------------------------|---------------------|--|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Ordem de magnitude ¹⁰ | 2 e 3 | 30 – 50 | 1 – 2 dias | 20 – 30 | 5 | 0,5 |
| Preliminar | 4 e 5 | 10 – 30 | 1 – 6 semanas | 10 – 20 | 15 – 20 | 2 – 5 |
| Definitiva | 6 | 10 | 3 meses | 6 – 10 | 50 – 60 | 10 – 15 |
| Detalhada | 7 e 8 | 5 | 2 – 9 meses | 4 – 7 | 90 – 100 | 50 – 60 |

Fonte: Adaptado de Revuelta e Jimeno (1997)

A partir dos dados da Tabela 1, pôde-se inferir que as primeiras etapas são as mais importantes para o projeto, pois elas determinarão se o empreendimento tem chances de ser realizado e por isso um alto nível de precisão é requerido. Vale ressaltar que não são computados os custos de pesquisa mineral, assim como o tempo necessário para a sua devida realização; por isso, somente é feita a análise dos dados já obtidos em estudos prévios. Assim as etapas 1, 9, 10 e 11 não foram relacionadas, por tratarem da execução do projeto de acordo com os estudos prévios.

O processo de estimação dos custos principais de um projeto é um ponto fundamental para uma melhor compreensão de seus principais componentes. Neste sentido, é conveniente lembrar a *lei de Pareto* (Juran e Godfrey, 1999) que afirma que, em geral, 20% dos conceitos principais têm um efeito de 80% nos custos totais. Isso implica que mesmo aumentando o número de itens incluídos no detalhamento do projeto, estes representam um aumento pouco significativo na precisão do projeto, pois apenas poucos itens têm significância na precisão de estimação dos custos dos projetos. A dificuldade está em determinar quais itens e como eles serão avaliados, no caso em que não se têm dados de projetos similares.

Os métodos de estimação de custos empregados estão associados às quatro etapas básicas apresentadas na Tabela 1. O volume de dados empregado em cada método marca a definição do grau de precisão a ser alcançado, o que indica a existência de possíveis variações entre os resultados obtidos entre os diferentes métodos, já que cada um demanda um volume e tipos diferentes de dados a serem analisados.

¹⁰ No que compete ao tamanho do empreendimento, podendo ser de pequeno, médio ou grande porte.

Em geral, os custos que são associados a cada método são de duas naturezas: custos de capital (investimento) e custos de operação. A maioria dos métodos aqui apresentados são de avaliação do capital a ser expendido, enquanto alguns métodos consideram os custos de operação na medida em que são apresentados dados a respeito da operação da mina, quando já são conhecidas as definições específicas dos projetos como método de lavra, beneficiamento, transporte e outros.

Os investimentos necessários para a implementação e operação de um projeto de exploração mineral têm dois componentes principais: o capital fixo (ativo/passivo) e o capital circulante (manutenção, operação, administrativos e outros). Os custos mais comuns relacionados à aquisição de capital fixo, segundo Revuelta e Jimeno (1997) e Hustrulid e Kuchta (1998), estão relacionados à:

- 1) aquisição de terrenos;
- 2) estudos e pesquisas;
- 3) desenvolvimento de pré-produção (ex.: decapeamento);
- 4) estudos ambientais e licenciamentos;
- 5) equipamentos de mineração, instalações e serviços;
- 6) equipamentos da planta (usina de beneficiamento) e serviços;
- 7) infraestruturas de acessos, telecomunicações, energia, água, entre outros;
- 8) engenharia;
- 9) construção e montagem e
- 10) contingências ou imprevistos.

O capital circulante é todo o dinheiro necessário para a operação do projeto mineiro e que deve estar “em caixa” para cobrir os gastos de operação como salários, impostos, material de manutenção, entre outros. O’Hara (1980) *apud* Revuelta e Jimeno (1997) recomenda que o capital circulante seja igual a quatro meses dos custos de operação. Hustrulid e Kuchta (1998) ressaltam, além dos itens anteriores, os seguintes centros geradores de despesa:

- supervisor de área;
- supervisor de mina;
- benefícios empregatícios;
- horas extras;
- gastos com o escritório de mineração;

- gastos com o escritório de chefia;
- pesquisa mineral;
- bombeamento;
- sondas de desenvolvimento;
- impostos da folha de pagamento;
- impostos locais e estaduais;
- seguros;
- ensaios de laboratório e
- depreciação das frotas e da planta de mineração.

Outras metodologias pregam que o capital circulante deve ser igual a 30% do total dos lucros anuais, ou que deve ser igual a um valor entre 10 e 15% do capital fixo. Mas é de senso comum que o capital circulante deve ser adquirido no início do projeto e que deverá ser recuperado no fim da vida útil do projeto (REVUELTA e JIMENO, 1997).

Para Ferreira e Andrade (2004), o capital de giro é uma parcela importante a ser considerada em um novo empreendimento. Sua estimação acontece apenas nos períodos iniciais de um projeto, mas também sua correção precisa ser feita caso futuras expansões de produção ocorram. O capital de giro deve cobrir os seguintes valores:

- estoques de minérios nas minas, valorizado pelos respectivos custos de produção e beneficiamento, não incluindo depreciação, amortização ou exaustão em tais custos;
- estoques de minérios em trânsito para os mercados, valorizados pelos custos de produção e beneficiamento, acrescidos dos tributos e do frete, inclusive o estoque regulador no porto de embarque no caso de exportações;
- despesas de administração correspondentes ao ciclo de produção e beneficiamento, transporte e embarque;
- almoxarifados de materiais e peças sobressalentes a preços de aquisição;
- recursos financeiros disponíveis em caixa e em bancos;
- custos das mercadorias vendidas a prazo;

- contas a pagar relativas aos materiais e serviços adquiridos para pagamento a prazo.

Os principais métodos usados para estimação de custos são o método da mesa redonda, o método do índice de faturamento, o método do custo unitário ou investimento, o método do ajuste exponencial da capacidade, custos de equipamentos, o método do índice de custo, o método do índice de custos dos equipamentos, o método do índice de custos de componentes, estimação detalhada, imprevistos, engenharia e estimação dos custos de operação. Cada um destes métodos são detalhados a seguir.

3.3.1 Método da mesa redonda

De acordo com Revuelta e Jimeno (1997), o método da mesa redonda consiste no estabelecimento subjetivo de um valor aproximado para um determinado projeto, baseado na comparação direta com outros projetos já realizados e na experiência dos seus participantes. Em geral é formado por especialistas das várias áreas envolvidas no projeto que, a partir de uma ou mais reuniões, estabelecem um custo total para o projeto.

Este método pode ser eficiente para pequenos projetos (pouco volume de capital inicial exigido). Pode ser considerado também como a base para a realização de projetos que exijam maior volume de capital despendido, necessitando posteriormente de projeto detalhado para determinação dos custos reais. O resultado desse método pode ser considerado o ponto de partida da maioria das negociações futuras.

3.3.2 Método do índice de faturamento

Segundo Revuelta e Jimeno (1997), este método consiste na divisão do valor de venda da unidade específica do produto (ex.: R\$150/ton.) pelo índice de faturamento vezes a produção anual do projeto, encontrando-se assim o custo a ser despendido no projeto. O índice de faturamento (ou vendas), no setor de mineração, varia geralmente entre 0,3 e 0,35.

Os valores do índice de faturamento são arbitrários, ou seja, variam de acordo com as demandas dos investidores e de características específicas de cada projeto, por isso a sua determinação é difícil nas fases iniciais de um projeto de mineração.

3.3.3 Método do custo unitário ou investimento

Este método consiste em multiplicar a capacidade de produção da instalação pelo custo da tonelada de material produzido ou tratado.

Um erro muito comum é a utilização deste método para valores de produção em que a capacidade seja ultrapassada para os dados presentes em uma determinada faixa. Por isso foi desenvolvido o método de ajuste exponencial da capacidade, descrito a seguir, na tentativa de minimizar os erros associados à extrapolação dos dados de projetos anteriores (REVUELTA e JIMENO, 1997).

3.3.4 Método do ajuste exponencial da capacidade

Este método, conhecido como a *regra de Williams* (REVUELTA e JIMENO, 1997), é utilizado quando é desejado obter uma ordem de magnitude para os investimentos com uma precisão de $\pm 25\%$.

Segundo Revuelta e Jimeno (1997) e Hustrulid e Kuchta (1998), o investimento “I” de um projeto varia com a capacidade e o tamanho do mesmo, de tal forma que podemos estimá-lo pela equação (1):

$$I = K [\text{Capacidade}]^x \quad (1)$$

em que:

K: constante;

x: fator exponencial ou de economia de escala.

Relacionando-se os investimentos inerentes a uma dada capacidade (I_1) com uma outra de capacidade maior (I_2), mantendo-se as outras variáveis como processos e tecnologias envolvidas, podemos definir a seguinte equação:

$$I_2 = I_1 \times \left[\frac{\text{Capacidade}_2}{\text{Capacidade}_1} \right]^x \quad (2)$$

O fator mais crítico na utilização deste método é a determinação de x . Em projetos de mineração é comum encontrar valores entre 0,5 e 0,9 para x .

Para Hustrulid e Kuchta (1998), a mesma analogia pode ser feita em relação à equação (2), porém estes autores relatam também a utilização de valores de projetos anteriores de igual

capacidade, que são atualizados através de um índice, muito comumente empregando a inflação do período como correção.

3.3.5 Custos de equipamentos

Alguns dos métodos de estimação dos investimentos têm como base o cálculo do custo dos equipamentos principais, e para tal é utilizada a seguinte equação (REVUELTA e JIMENO, 1997):

$$Custos = a \times (X)^b \quad (3)$$

em que:

X é o parâmetro característico do equipamento (como m^3);

a e b são constantes ajustadas de acordo com os preços correntes para um determinado tipo de equipamento e seu respectivo valor para X .

Em muitos casos, os valores de a e b se diferenciam para intervalos de X diferentes, gerando resultados mais próximos da realidade.

Para InfoMine (2011) os equipamentos principais, correspondentes ao maior percentual dos investimentos, em geral, remetem a aquisição dos seguintes ativos:

1. **Equipamentos de mina a céu aberto:** perfuratrizes, escavadeiras, tratores, motoscrapers, caminhões (fora-de-estrada, rodoviários, de combustível, de apoio e tanque), motoniveladoras, pá carregadeiras, retroescavadeiras, draglines, bucket wheel, entre outros;
2. **Equipamentos de beneficiamento:** britadores, ciclones, filtros, alimentadores, jigs, fornos, espessadores, peneiras, moinhos de bola ou de barras, classificadores, secadores, misturadores, células de flotação, entre outros;
3. **Equipamentos de mina subterrânea:** perfuratrizes, carregadeiras, guindastes / içadores, aspersores de poeira, LHDs (*loud, haul, dump*, que significa: carregar, transportar e descarregar, desenvolvidas por um único equipamento), jumbos, equipamento para inserir hastes de estabilidade de teto, máquina de escavar túneis, sistemas de ventilação, mineradores contínuos, entre outros;

4. **Equipamentos diversos:** correias transportadoras, filtros, geradores, viradores de vagões, empilhadeiras, motores elétricos, bombas, dragas, compressores, tanques, subestações elétricas, entre outros.

3.3.6 Método do índice de custo

Este método requer a levantamento inicial de quais são os equipamentos de mina ou da planta de tratamento. Sabendo que o custo destes equipamentos é igual a I_E e que existe uma relação de proporcionalidade destes equipamentos com o valor total do investimento, podemos montar a seguinte equação (REVUELTA e JIMENO, 1997):

$$\begin{aligned} \text{Investimento Total do Projeto } (I_T) \\ = K \times \text{Custo do Equipamentos principais } (I_E) \end{aligned} \quad (4)$$

Segundo os autores, a precisão deste tipo de estimacão alcança 20%. No entanto, para que se possa aplicar esta equação é necessário um maior conhecimento do projeto, o que evidencia a sua pouca aplicabilidade, pois com um maior número de dados é possível expandir esta equação para uma nova ordem de fatores correlacionados e que darão uma ordem de precisão mais elevada e aceitável para a avaliação de projetos de mineração.

3.3.7 Método do índice de custo dos equipamentos

Este método é um aprimoramento do método apresentado no item 3.3.6, pois, ao invés de utilizar apenas um fator para o conjunto de equipamentos-alvo do projeto, é analisado um conjunto de fatores para cada conjunto de equipamentos a serem discriminados e separados em conjuntos (apoio, perfuração, desmonte, entre outros). Quanto maior for o nível de precisão requerido, maior será o número de conjuntos e seus respectivos fatores. Assim, pode-se formular a seguinte equação do custo total (REVUELTA e JIMENO, 1997):

$$I = \sum_{\forall i} (K_i \times C_i) \quad (5)$$

em que:

I = custo total da instalação;

K_i = fator de custo dos equipamentos do conjunto i ;

C_i = custo do equipamento do conjunto i .

3.3.8 Método do índice de custos de componentes

Este é o método mais utilizado a nível básico de pesquisa porque possui um erro associado de $\pm 15\%$. Da mesma forma que o método anterior, baseia-se na discriminação dos equipamentos principais e auxiliares, somando-se um fator correspondente à média de todos os fatores dos conjuntos de equipamentos (REVUELTA e JIMENO, 1997).

A este método é acrescido um fator que é inerente a qualquer projeto de investimento, que são os custos indiretos e de projeto de engenharia. Para tal é estipulado um valor provável, pois não se consegue prever quais os reais valores imprevistos (REVUELTA e JIMENO, 1997).

$$I_T = I_E \times \left(1 + \sum_{\forall i} \left(\frac{K_i}{100} \right) \right) \times (1 + g) \quad (6)$$

em que:

I_T = Custo total da instalação;

I_E = Custo total dos equipamentos principais e auxiliares;

K_i = Índice do custo do conjunto i expresso pela percentagem do total;

g = Fator de custos indiretos, como imprevistos e projeto de engenharia.

3.3.9 Estimação detalhada

Este método é o mais detalhado, pois tem por base a engenharia em detalhe, fluxos dos processos de produção e beneficiamento e listas de equipamentos em que aparecem as especificações, modelos e quantidades. Para que tal etapa seja realizada é necessário que já se tenha feito as negociações com os fabricantes e distribuidores para a obtenção de informações o mais próximo possível da realidade (REVUELTA e JIMENO, 1997).

A estimativa detalhada serve como guia para a aquisição das máquinas, assim como elemento de controle e referência durante o desenvolvimento e construção do projeto. Cada elemento de custo deve estar discriminado, como mão-de-obra, materiais, equipamentos, serviços, entre outros. Este nível de detalhamento também ajuda no momento em que o projeto será executado, pois ajuda a determinar a ordem em que as tarefas devem ser executadas (REVUELTA e JIMENO, 1997).

3.3.10 Imprevistos

Em todos os tipos de estimativa de custos existe uma série de elementos que tem seu valor aumentado na medida em que a soma dos demais elementos de um projeto também tem um acréscimo. Estes elementos são conhecidos como imprevistos ou contingências, e são resultados de uma definição incompleta dos projetos de engenharia. Para esta variável também são associados os erros de estimativa dos custos dos equipamentos (REVUELTA e JIMENO, 1997).

O percentual de imprevistos associados ao projeto está diretamente relacionado ao tipo e precisão da estimativa utilizada. Segundo Revuelta e Jimeno (1997), em projetos de mineração, um erro de 15% sobre o capital total a ser despendido pode ser inferido devido ao fato de muitas vezes no projeto detalhado estarem omissos equipamentos de pequeno porte e de apoio, mas que são de grande importância para ajudar na manutenção das operações. No caso de empresas prestadoras de serviços terceirizados, esta margem de erro pode ser associada a um fator de 5% de seu valor de serviços prestados, pois elas, por contrato, devem ter um controle mais rigoroso de seus custos de operação, ou então, deixam de operar.

3.3.11 Engenharia

Os gastos com engenharia, em projetos de mineração, se relacionam à realização de trabalhos de seleção de equipamentos, desenho de cavas, desenvolvimento e supervisão dos projetos, estudos do mercado de compra dos produtos, previsões de demanda e produção, oportunidades, estudos de localização das facilidades, ensaios e pesquisas preliminares, edificações, projetos complementares, entre outros. Esses gastos envolvem todas as atividades

necessárias para se administrar e garantir que a mineração dê lucro a curto, médio e longo prazo (REVUELTA e JIMENO, 1997; FERREIRA e ANDRADE, 2004).

De acordo com Revuelta e Jimeno (1997), os custos de engenharia devem ser entre 10% e 15% dos custos totais dos equipamentos a serem adquiridos.

3.3.12 Estimação dos custos de operação

Os custos de operação são definidos, de acordo com Revuelta e Jimeno (1997), como aqueles que são gerados de forma contínua durante o funcionamento de uma operação, podendo ser divididos em diretos, indiretos e gerais.

3.3.12.1 Custos diretos

Os custos diretos ou variáveis são considerados como os custos primários de uma operação ou realização de trabalho e, basicamente, consistem no provisionamento de material e de pessoal:

- A. Pessoal:
- de operação;
 - de supervisão da operação;
 - de manutenção;
 - de supervisão da manutenção;
 - outros encargos salariais.

Para O'Hara e Suboleski (1996), o custo de operação e de capital é influenciado pela quantidade de pessoas necessária para operação, usina de beneficiamento e serviços. O efetivo necessário é estimado, segundo os autores, dando-se pesos para as relações direta e inversamente proporcionais das médias da largura de escavação e a produção diária, atribuídos de acordo com a atividade e tipo de mineração¹¹.

- B. Materiais:
- reposições e materiais de reparação;
 - substâncias para o beneficiamento e preparo do produto final;
 - matérias primas;

¹¹Para mais informações sobre os estimadores do número de pessoal, consultar O'Hara e Suboleski (1996), p. 406 e 407.

- insumos: gasolina, eletricidade, água entre outros;

C. Impostos:

Segundo o DNPM (2010), os principais impostos vigentes no Brasil que são aplicados em empreendimentos de mineração, salvo suas devidas proporções de acordo com a unidade federativa em que ela se encontra, resumidamente são:

- encargos trabalhistas – INSS, FGTS, entre outros;
- Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais – CFEM;
- Imposto de Renda de Pessoa Jurídica – IRPJ;
- Contribuição Social Sobre Lucro Líquido – CSLL;
- Programa de Integração Social – PIS;
- Contribuição para Financiamento da Seguridade Social – COFINS;
- Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviço – ICMS.

D. Preparação e desenvolvimento (Área de Produção):

- decapeamento do estéril;
- construção de facilidades;
- estradas de acesso;
- entre outros.

3.3.12.2 Custos Indiretos

Os custos indiretos ou fixos são aqueles que são considerados independentes da produção. Estes tipos de custos podem variar com o nível de produção projetado, porém não é uma relação direta ou inversa com a produção obtida. Seus componentes principais são (REVUELTA e JIMENO, 1997):

A. Pessoal:

- administrativo;
- segurança;
- técnicos;
- serviços terceirizados;
- armazéns e oficinas
- outros encargos salariais.

- B. Seguros:
 - da propriedade e de responsabilidade.
- C. Amortização.
- D. Juros.
- E. Impostos.
- F. Recuperação de áreas degradadas.
- G. Viagens, reuniões, congressos e doações.
- H. Gastos de oficinas e serviços.
- I. Relações Públicas e Publicidade.
- J. Desenvolvimento e Preparação (para a totalidade da exploração).

3.3.12.3 Custos Gerais

Em geral como custos gerais, não são considerados os gastos da operação, mas sim um determinado processo ou operação a nível corporativo de um ciclo completo de produção. Nesses custos são incluídos (REVUELTA e JIMENO, 1997):

- A. Comercialização:
 - vendedores;
 - estudos de mercado;
 - supervisão;
 - viagens e gastos de representação;
 - outras cargas salariais.
- B. Administrativos:
 - gerência e direção geral;
 - contabilidade;
 - departamento central de planejamento e geologia;
 - departamento jurídico, financeiro entre outros.

Devido à grande variedade de componentes e as particularidades dos custos de cada tipo de empreendimento mineiro, os estimadores de custos devem ser relacionados às respectivas demandas de cada empreendimento. Nem todos os itens descritos anteriormente podem aparecer nos centros de custo ou possuir importância relativamente baixa no momento de se elaborar um projeto de grandes proporções, mas cabe ressaltar que quanto maior o nível

de detalhamento de um projeto, menor será o erro associado aos dados nele contidos (REVUELTA e JIMENO, 1997).

Um ponto fundamental a ser analisado durante o processo de custeio das operações de uma mina é a determinação dos ciclos básicos de operação para se determinar quais operações deverão ser realizadas para a exploração e comercialização do minério, e, assim, planejar a aquisição de equipamentos.

3.4 Tarefas básicas no ciclo de produção

Segundo Hartman (1992), no processo de extração mineral há um número definido de tarefas básicas e fundamentais cuja reprodução regular e repetitiva constitui o ciclo de mineração. Estas tarefas básicas são agrupadas e formam unidades de operação tais como operação de produção, auxiliares, entre outros, identificando assim o processo em que cada tarefa está associada.

Com o objetivo de minimizar os custos e maximizar a produtividade, o desenho da cava deve seguir algumas premissas básicas:

1. a produtividade de cada elemento de operação está associada à sua respectiva interação com sua unidade de produção e o ciclo de mineração;
2. mais de um mesmo equipamento será utilizado para diminuir os riscos associados a danos ou perdas em equipamentos de grande porte, diminuindo também os custos de aquisição;
3. o *layout* da mina deve ajudar a minimizar os movimentos não produtivos das máquinas;
4. as unidades de operação devem estar ligadas de tal forma que garantam o contínuo fluxo de material através de todas as unidades.

Para uma mineração a céu aberto genérica, pode-se montar o ciclo de operações contidas na Tabela 2:

Tabela 2: Ciclo de operações de uma mina a céu aberto genérica

| PASSOS DAS UNIDADES DE OPERAÇÃO: | |
|---|---|
| 1. | Instalar controle de erosão e de sedimentos: Os passos 1 e 2 são realizados apenas quando mineradas novas áreas. Proceder para o passo 3 se entrando em região já explotada. <ul style="list-style-type: none"> a. Valas, desvios, terraços e canais. b. Lagoas. |
| 2. | Decapeamento do estéril <ul style="list-style-type: none"> a. Depositar em pilhas temporárias para futura recuperação de área. b. Depositar diretamente para recuperação de área. |
| 3. | Preparação da bancada para perfuração: Se o material for suficientemente friável a ponto de não necessitar de desmonte por detonação, então passar para o passo 6. <ul style="list-style-type: none"> a. Acertar a bancada com escavadeira. b. Inspeccionar as cristas das bancadas para verificar a existência de grandes blocos de rochas que possam se desprender. c. Levantamento e marcação dos furos. |
| 4. | Perfuração dos furos de detonação. |
| 5. | Detonação <ul style="list-style-type: none"> a. Carregamento dos explosivos nos furos de detonação. b. Conectar os furos de detonação com cordel detonante ou outros detonadores de forma a gerar a sequência de explosão desejada. c. Detonar no momento mais seguro para fazê-lo. |
| 6. | Carregamento do material fragmentado: O material fragmentado será carregado através do equipamento de carregamento. <ul style="list-style-type: none"> a. Em pedreiras ou em minas a céu aberto, o carregamento será realizado diretamente no equipamento de transporte. |
| 7. | Transporte de material <ul style="list-style-type: none"> a. Minério, carvão ou outro material de valor é transportado até o processo subsequente. b. O estéril é transportado para local de armazenamento definitivo. c. O transporte pode ser contínuo ou cíclico. <ul style="list-style-type: none"> i. Contínuo com o uso de transportadores de correias ii. Cíclico com o uso de equipamento de carregamento e transporte em pequena distância. |
| 8. | Depósito de estéril e de rejeito <ul style="list-style-type: none"> a. Armazenamento do decapeamento e de outros materiais estéreis <ul style="list-style-type: none"> i. Pilhas de estéril. ii. Recomposição de áreas degradadas. b. Preparação do rejeito da usina <ul style="list-style-type: none"> i. Armazenagem em barragens de contenção de rejeitos. ii. Integração com o armazenamento do decapeamento. |
| 9. | Recuperação de áreas <ul style="list-style-type: none"> a. Em cavas finais. b. Em pilhas de rejeito ao final da vida útil da mina. |
| 10. | Descomissionamento: não é realizado no final de todo ciclo. Pode começar a ser realizado em época favorável, após uma determinada área aproximar-se do término de sua vida útil. <ul style="list-style-type: none"> a. Revegetação <ul style="list-style-type: none"> i. Com cobertura proveniente de vegetação temporária. ii. Com cobertura proveniente de vegetação permanente. b. Manutenção até o tempo necessário por lei seja atingido. c. Remoção do sistema de drenagem. |
| 11. | Retornar ao passo 1. |

Fonte: Hartman (1992).

A partir da análise das operações básicas para a operação e produção de uma mina a céu aberto (Tabela 2), torna-se evidente a necessidade de se determinar, nos estágios de avaliação de um projeto de mineração, qual deverá ser o conjunto de equipamentos responsáveis pela carga e transporte.

Na Figura 1 é representado um ciclo de operações comumente utilizado em minas de minério de ferro.

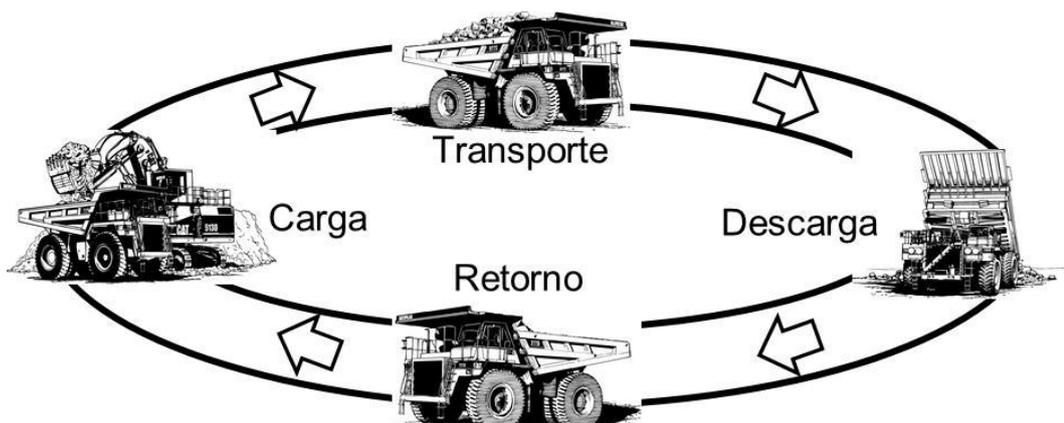


Figura 1: Ciclo básico de operações unitárias de carga e transporte
Fonte: Adaptado de Richards e West (2003).

O ciclo apresentado na Figura 1 é constituído de uma escavadeira *shovel* e caminhões fora-de-estrada. Este ciclo é utilizado tanto para a retirada do minério quanto para o estéril de uma mina. O conjunto de equipamentos apresentado é apenas uma das configurações possíveis e empregada de acordo com as características geradas pelo conjunto escavadeira/caminhão. Quando se possui grande quantidade de material a ser carregado e transportado por pequenas distâncias com reservas suficientes para serem lavradas por um grande período de tempo, a configuração da Figura 1 se mostra viável em vários casos.

Para se determinar o conjunto ideal de equipamento de carga e transporte, algumas considerações e cálculos devem ser feitos para o seu correto dimensionamento e seleção.

3.5 Dimensionamento e seleção dos equipamentos principais de carga e transporte

A partir do momento que se determina o método a ser utilizado para a exploração de uma jazida e seus respectivos ciclos básicos de operação, são realizadas as tarefas de dimensionamento dos equipamentos de lavra e beneficiamento necessários para se atingir as metas de produção. Em especial neste trabalho, serão analisados os equipamentos para carga e transporte de *ROM*, devido ao fato deste representar grande parte dos custos do produtos (LOPES, 2010).

Após o dimensionamento, é realizado o estudo de seleção do conjunto de equipamentos de maneira que minimize o custo unitário de produção para o referido projeto de mineração. Para tal são propostas várias ferramentas econômicas amplamente utilizadas no mercado para a seleção de projetos.

3.5.1 Dimensionamento dos equipamentos principais de carga e transporte

Para o correto dimensionamento dos equipamentos em uma mina a céu aberto, é necessário, primeiramente, a definição e conhecimento de alguns termos técnicos que tratam de características importantes de cada equipamento de carregamento e transporte. Dentre as principais características pode-se citar (HARTMAN, 1992; GONTIJO, 2009; RICHARDS e WEST, 2003):

- 1) Produção: é o volume total ou massa do material que será movimentado em uma operação específica e se refere tanto a minério quanto a estéril;
- 2) Taxa de produção: produção teórica de massa ou volume de uma máquina por unidade de tempo. É usualmente expressa em horas, porém pode ser relacionada a turno ou dia de trabalho;
- 3) Produtividade: é a taxa real de produção por unidade de tempo, considerando-se todos os outros fatores de gerenciamento, tais como eficiência, sendo analisado também o trabalho em conjunto com outros equipamentos;
- 4) Eficiência: percentual das horas realmente trabalhadas em relação às horas programadas. Reduções na taxa eficiência podem ser relacionadas aos seguintes fatores:

- a. características do material;
- b. supervisão no trabalho;
- c. esperas no britador;
- d. falta de caminhão;
- e. maior ou menor habilidade do operador;
- f. interrupções para limpeza da frente de lavra;
- g. qualidade do desmonte de rochas;
- h. capacidade da caçamba de máquina de carregamento;
- i. pequenas interrupções devido a defeitos mecânicos, não computados na manutenção.

A eficiência pode ser expressa como sendo:

$$Eficiência = \frac{\text{minutos trabalhados em 1 hora}}{1 \text{ hora}} \times 100\% \quad (7)$$

Analisando a equação (7), pode-se concluir que, quanto mais minutos de trabalho efetivo de um equipamento forem trabalhados em uma hora, maior será sua eficiência, aproximando-se do máximo teórico de 100%. Devido a procedimentos de manutenção e deslocamento, é impossível se alcançar este máximo no que se refere à equipamentos de carregamento e transporte.

5) Disponibilidade: parte do tempo programado em que a máquina está disponível para trabalhar. A disponibilidade pode ser:

- a. Mecânica: que considera as horas possíveis de serem trabalhadas menos as horas de manutenção (preventiva, corretiva e preditiva).
- b. Física: é a disponibilidade real da máquina, pois, considera todos os possíveis descontos nas horas de trabalho como: esperas, paradas não programadas, deslocamentos, entre outros.

6) Utilização: parte do tempo disponível em que o equipamento está realmente trabalhando. Alguns fatores que influenciam na utilização de um equipamento são:

- a. número de unidades ou porte maior ou menor do que o requerido;

- b. paralização de outros equipamentos;
- c. falta de operador;
- d. deficiência do operador;
- e. condições climáticas que impeçam a operação do equipamento;
- f. qualidade do desmonte de rocha;
- g. preparação das frentes de lavra.

A taxa de utilização é expressa por:

$$Utilização = \frac{\text{horas efetivamente trabalhadas}}{\text{horas calculadas por ano} - \text{horas de manutenção}} \quad (8)$$

7) Capacidade: refere-se ao volume de material que um equipamento pode carregar ou transportar. A capacidade de carregamento e transporte pode ser:

- a. Rasa: quando a capacidade nominal não é atingida, devido a fatores de operação que não permitem o completo preenchimento da caçamba.
- b. Coroadas: quando se explora ao máximo a capacidade de um equipamento, mesmo que seja pouco provável ser operacionalmente viável;

8) Carga útil: é a massa de material que o equipamento pode carregar ou transportar, não podendo ultrapassar 80% da carga necessária para desestabilizar ou pôr em risco a operação (80% da carga de tombamento). Em geral, os equipamentos são projetados para conter uma massa específica ao invés de um volume específico, possibilitando ajustes da capacidade, por parte do comprador;

9) Empolamento: é o aumento do volume aparente de um material que ocorre quando é fragmentado e removido de seu estado natural, mais compacto, para um estado mais solto (desagregado/fragmentado). Pode ser expresso pela seguinte equação:

$$Empolamento = \frac{\text{volume antes da fragmentação}}{\text{volume depois da fragmentação}} \times 100\% \quad (9)$$

10) Fator de enchimento da caçamba: fator aplicável sobre a capacidade operacional da caçamba e que, basicamente, apresenta-se em função das características do material, e ou das condições do desmonte, da altura da bancada e da

forma de penetração do equipamento, determinando o percentual de enchimento da caçamba;

11) Ciclo: assim como comentado na seção 3.4, as operações de uma mina são compostas de tarefas básicas que compõem um ciclo de operações. Em geral, tarefas como carregamento, transporte, descarregamento e retorno são repetidas continuamente. A contabilização do tempo necessário para a realização de cada tarefa faz com que o somatório dos tempos necessário para completar um ciclo seja chamado de “tempo de ciclo”;

12) Operação Conjugada: é a partir da análise da operação conjugada entre os equipamentos de carregamento, transporte e britagem que se determina a produção máxima que um sistema pode gerar, através da associação da distribuição binomial, calculada com as probabilidades de disponibilidade de operação de cada máquina e suas possíveis combinações;

13) Resistência: pode ser o atrito existente entre o pneu e a superfície da estrada, entre o eixo da roda e o sistema de locomoção e de desnível provocado por uma rampa (aclives). Todos estes fatores devem ser considerados, pois cada equipamento tem um nível de operação ideal, fornecido pelo fabricante, que determina as condições da estrada de rodagem e do percentual (ângulo) de rampa que o equipamento é capaz de operar.

14) Desenho das estradas e acessos: de acordo com os equipamentos que irão trafegar pelas estradas, condições especiais são necessárias para a operação dos mesmos. Alguns itens devem ser considerados para construção e manutenção do pavimento, garantindo a segurança das pessoas e o menor custo de manutenção dos equipamentos. Pode-se observar alguns dos principais itens de construção de estradas para o tráfego de caminhões fora-de-estrada nas Figura 2 e 3.

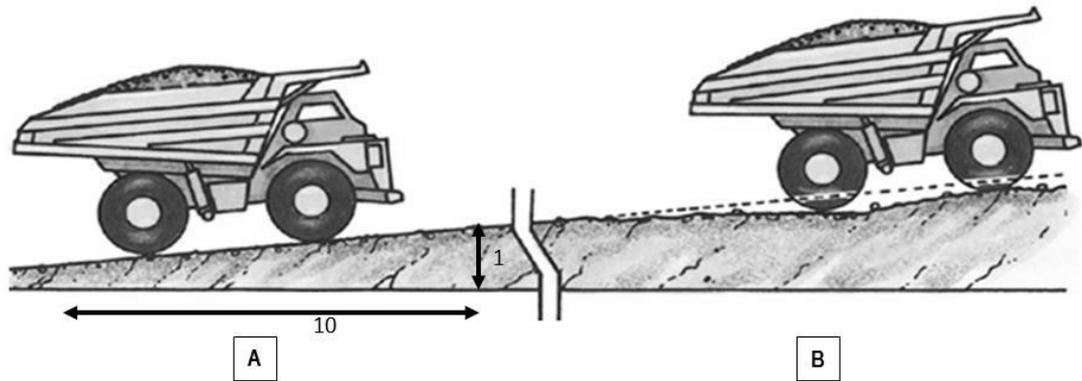


Figura 2: Inclinação e manutenção da estrada
 Fonte: Adaptado de Richards e West (2003).

Na Figura 2, pode-se observar as situações A e B de construção e manutenção de uma estrada. Na situação A, foi respeitada a construção de rampa com inclinação igual a 10%, ou seja, a cada 10 m percorridos na horizontal, 1m será percorrido na vertical, em toda a sua extensão. Na situação B, a inclinação não foi respeitada, fato este decorrido de má construção ou manutenção falha da estrada. A inclinação de uma estrada e sua devida conservação é um item que deve respeitar os limites operacionais pré-estabelecidos pelo fabricante dos equipamentos, devendo ser o menor possível para se evitar o gasto excessivo com combustível, pneus e peças do trem-de-força dos equipamentos. Caso essa inclinação não possa ser minimizada, deve preferencialmente ser a menor das inclinações máximas do conjunto de equipamentos que trafegaram por esta estrada. Na Figura 3, são apresentados outros três itens de segurança a serem observados em uma estrada.

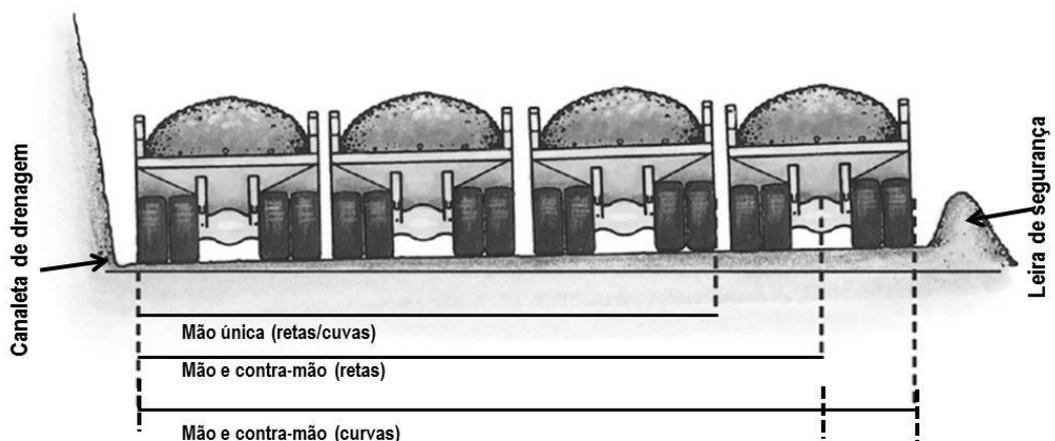


Figura 3: Itens para operação com segurança
 Fonte: Adaptado de Richards e West, 2003.

O primeiro item de segurança é a largura da estrada. Caso seja de mão única, deverá ter no mínimo três vezes a largura do equipamento mais largo que trafegará por ela, tanto nas retas quanto nas curvas. Caso seja mão e contra-mão, deverá ter no mínimo três vezes e meia nas retas ou quatro vezes nas curvas a largura do equipamento mais largo que trafegar por ela. O segundo item são as canaletas de drenagem de água pluviais, que juntamente com uma inclinação mínima no sentido leira-canaleta, transversal à pista da estrada, garantam que as águas das chuvas sejam drenadas evitando um número excessivo de poças, lama, dificuldade de locomoção dos equipamentos e carregamento do material constituinte da pista e das encostas da estrada. O terceiro item são as leiras de segurança que constituem barreiras físicas na tentativa de se alertar/amortecer possíveis impactos dos equipamentos perto das regiões de crista de encostas, evitando assim acidentes mais graves. As leiras devem ser construídas com altura mínima correspondente à metade do diâmetro máximo do pneu que trafegar por esta estrada.

Outros itens para a construção de estradas e acessos devem ser considerados, tais como:

- a análise da capacidade de carga do substrato da seção transversal do pavimento;
- o raio mínimo das curvas;
- a sinalização;
- o tamanho mínimo das praças de carga;
- o planejamento e formação de equipe de manutenção das estradas, entre outros.

Uma característica muito importante para a correta operação conjugada dos equipamentos e que deve ser analisado em sua aquisição é a compatibilidade do porte dos equipamentos.

3.5.1.1 Compatibilidade do porte dos equipamentos

Com a análise das requisições específicas para a operação dos equipamentos, de acordo com as condições estudadas e pré-estabelecidas no planejamento da lavra, ao se selecionar os equipamentos é de suma importância que também sejam analisados o porte destes equipamentos para que seja possível o trabalho em conjunto, da forma mais eficiente possível, evitando que alternativas impraticáveis sejam analisadas (GONTIJO, 2009).

A compatibilidade entre os equipamentos segue, em muitos aspectos, a análise das dimensões físicas da área de lavra e as restrições de operação dos equipamentos. Dentre as

principais características, pode-se ressaltar a altura da bancada condicionando o porte do equipamento e o tipo de carregamento a ser realizado.

Na Figura 4 pode-se observar uma série de equipamentos que fazem parte de minas a céu aberto, mas que não necessariamente estão presentes em todas as minas. A exemplo, no nível mais baixo da cava, uma escavadeira de grande capacidade opera em conjunto com caminhões fora de estrada. No nível intermediário uma pá carregadeira também opera em conjunto com caminhão fora-de-estrada. Pode-se destacar a presença, nos níveis intermediário e superior, de equipamentos auxiliares de operação, onde são realizadas operações de perfuração e preenchimento de furos para o desmonte por explosivos. A presença de equipamentos auxiliares é muito importante para dar suporte às operações principais de uma mina.

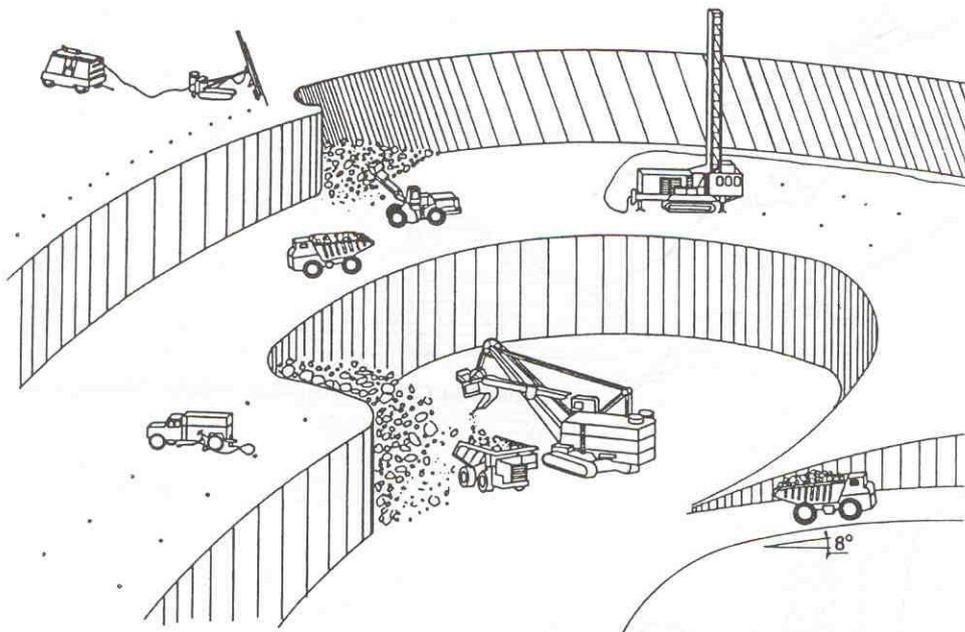


Figura 4: Equipamentos de desmonte, carregamento e transporte
Fonte: Desconhecida

A Figura 5 apresenta as dimensões de operação de uma escavadeira de rodas fornecidas pelo fabricante.

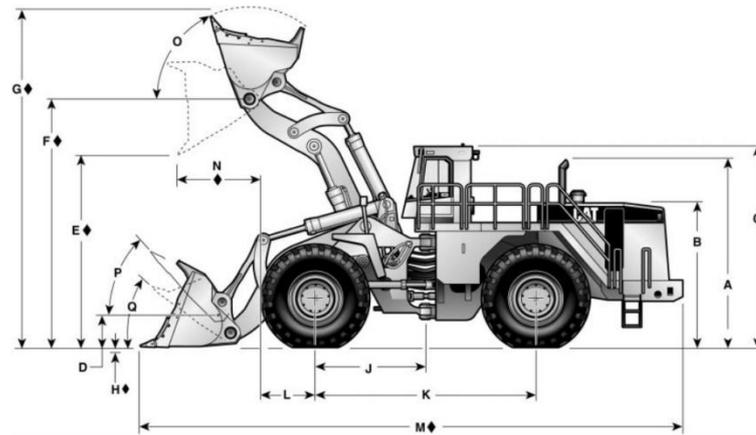


Figura 5: Dimensões de uma escavadeira de rodas
Fonte: Caterpillar (2009).

A partir da análise da Figura 5, tem-se um exemplo das limitações de operação de uma escavadeira de rodas. Para que esta escavadeira seja capaz de trabalhar em conjunto com outros equipamentos de transporte, estes por sua vez devem:

- ter uma altura máxima menor que a altura $F \blacklozenge$;
- conseguir trabalhar com segurança abaixo da altura $E \blacklozenge$;
- estar posicionado a, no máximo, uma distância $N \blacklozenge$ da escavadeira.
- ter uma praça de carga que permita manobras de um equipamento de tamanho $M \blacklozenge$, entre outras.

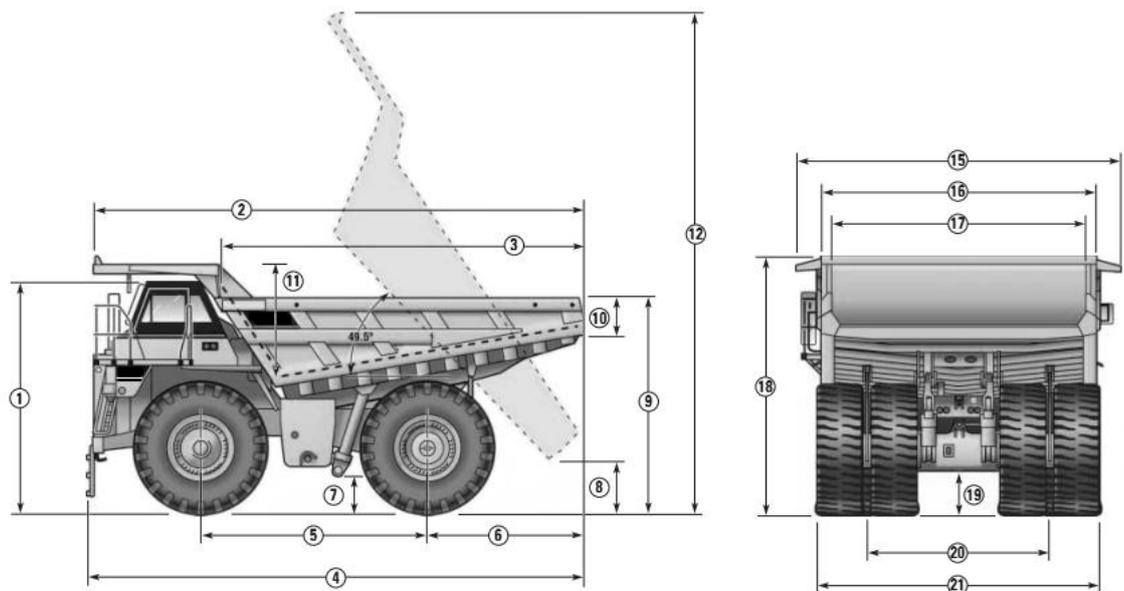


Figura 6: Dimensões de um caminhão fora-de-estrada
Fonte: Caterpillar (2009).

Um conjunto de carga e transporte muito utilizado em minas de minério friável, é o formado por escavadeiras de rodas e caminhões fora-de-estrada (Figura 6). Para trabalhar com eficiência em minérios mais compactos, é necessário ter granulometria reduzida. Este tipo de conjunto deve ter uma escala ótima tal que ambos, escavadeira e caminhão, respeitem suas dimensões operacionais. Essa configuração possui entre suas vantagens a possibilidade de uma lavra mais seletiva, permitindo rápida mobilidade de uma frente de lavra para outra, possibilitando a blindagem do minério de maneira a atender com maior rigor as especificidades do produto desejado. Em contrapartida essa alta mobilidade dos equipamentos gera custos adicionais com o desgaste de componentes, gerando custos adicionais e margens de lucro menores do que outras configurações de equipamentos.

Na Figura 7, tem-se o uso de uma retroescavadeira em conjunto com caminhões, possibilitando outro conjunto de operação de lavra.

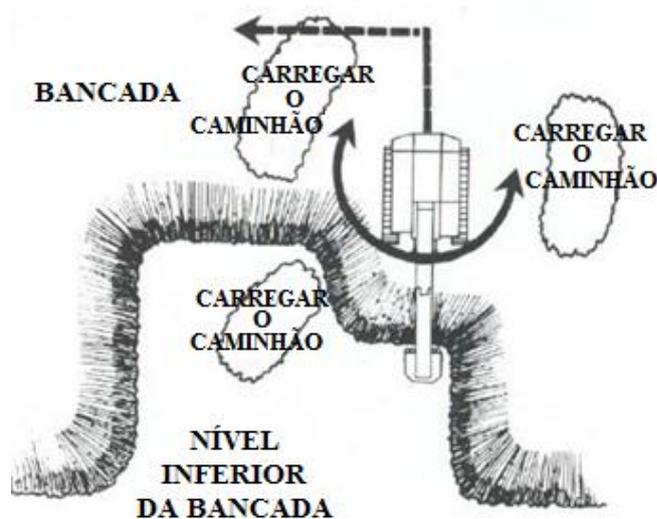


Figura 7: Uso de retro escavadeira em cima de bancada
Fonte: Adaptado de Martin *et al.*, 1982.

Analisando a Figura 7, pode-se perceber que também é possível a utilização de retroescavadeiras operando em cima da bancada, podendo carregar os caminhões tanto na parte superior como inferior da bancada. Este fato é possível devido à altura da bancada na mina, que permite à lança da retro escavadeira operar com facilidade em ambos os níveis. Esta medida deve ser prevista durante as etapas de desenho da mina, possibilitando a utilização desse tipo de equipamento.

Muitas vezes, o volume de produção exigido para viabilizar um projeto demanda a utilização de equipamentos de maior porte. Na Figura 8, tem-se o exemplo da utilização de uma escavadeira do tipo dragline.

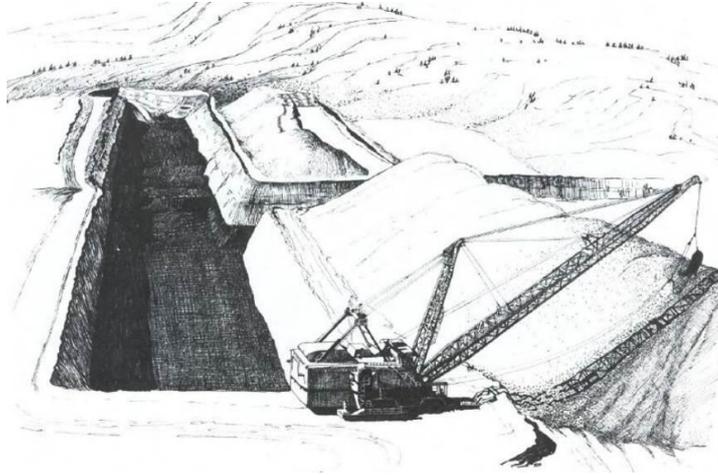


Figura 8: Dragline em operação
Fonte: Adaptado de Martin *et al.*, 1982.

Em geral, a operação de dragline é associada a minerações de carvão friável em que a ocorrência do minério acontece em faixas estreitas de grandes extensões de baixo mergulho, que ficam sob espessa camada de capeamento. Nestes casos, as draglines são recomendáveis, mesmo possuindo um alto valor de aquisição, uma vez que seus custos de operação, comparados com os volumes movimentados, compensam economicamente, além do fato de que tanto o estéril quanto o minério serem friáveis.

Na Figura 9, é apresentado uma BWE (*bucket wheel excavator* – retomadora de caçamba) em operação, como outra alternativa para a lavra de grandes jazidas de baixo mergulho, com capeamento e minério friáveis.

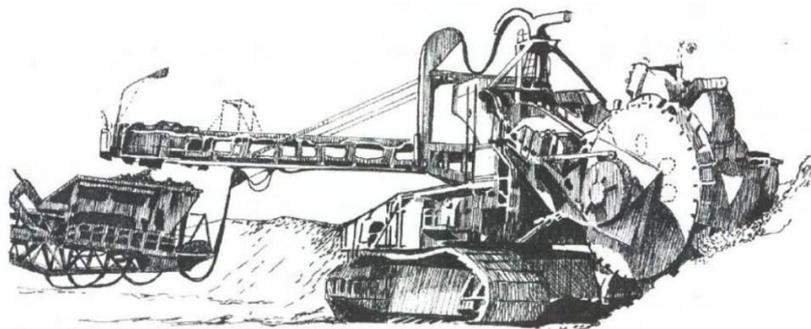


Figura 9: Bucket Wheel em operação em conjunto com transportador de correia
Fonte: Adaptado de Martin *et al.*, 1982.

Um fator de grande importância econômica é o fato de ser um equipamento de produção contínua, o que ajuda a diminuir os custos de operação, pois, em geral, está associado a um sistema de correias transportadoras. Um dos limitantes de sua utilização é ter mobilidade baixa e de ser apenas utilizável para a mineração de materiais com baixa resistência ao impacto, sendo, assim como a dragline, muito utilizada para a mineração de carvão a céu aberto.

Na Figura 10, é mostrado um exemplo de transportador de correia, que é uma opção de transporte muito associada a outros equipamentos de carregamento.

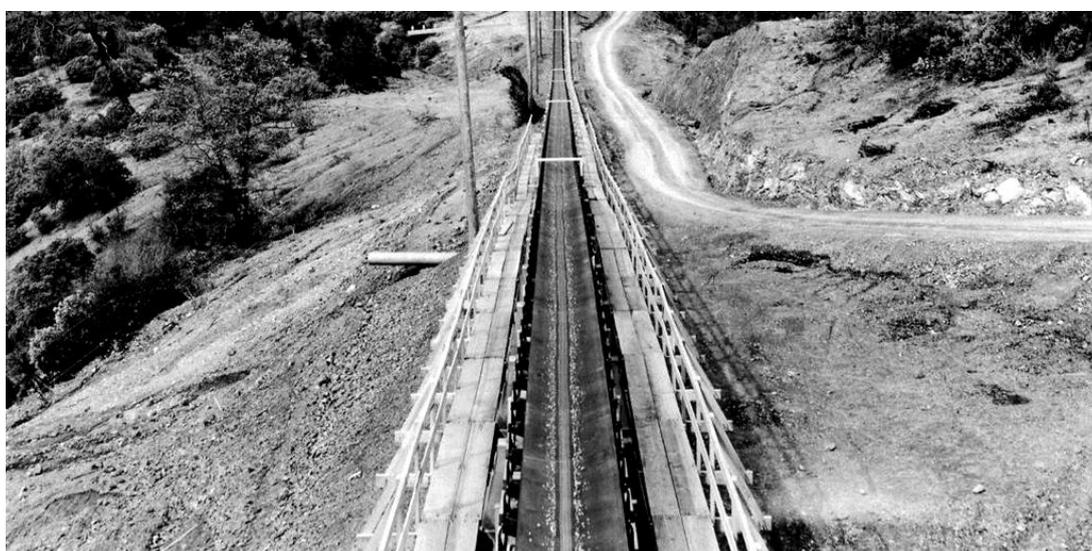


Figura 10: Transportador de correia
Fonte: Adaptado de Smith (2008).

A utilização de correias transportadoras é uma opção que tem ganhado espaço nos últimos anos, devido ao fato das jazidas minerais hoje exploradas terem um teor de minério contido cada vez mais baixos. Alguns teores, hoje considerados economicamente viáveis para exploração, são considerados inferiores aos teores de corte¹² do passado. Dai a necessidade de se transportar um volume muito grande de material para o beneficiamento. A utilização de correias transportadoras para distâncias médias (± 15 Km) se faz economicamente viável em muitos casos. Apesar de seu alto custo inicial, associado às especificidades de implantação (nivelamento do terreno, utilização de britador primário para homogeneização do material entre outros), os custos de manutenção são reduzidos em relação ao volume transportado.

¹² O teor de corte é o teor de minério a partir do qual a lavra é viável economicamente.

Observadas as restrições de compatibilidade dos equipamentos com os volumes e métodos de lavra, outros fatores devem ser levados em consideração.

O número de passes do equipamento de carregamento para encher o equipamento de transporte, deve ser considerado entre três e cinco passes (caçambadas) para se estabelecer um bom equilíbrio, caso contrário, ocorreria (GONTIJO, 2009):

- com número maior de passes o tempo necessário para se encher a caçamba do equipamento de transporte seria elevado, podendo acarretar em um custo adicional por necessitar de uma frota de transporte maior e que, por consequência, gerariam mais custos por estarem esperando em fila de carregamento;
- com número menor de passes o tempo para o carregamento do equipamento de transporte poderia ser menor, porém a carregadeira ficaria mais tempo ociosa. Além do fato de que o rápido lançamento de grande quantidade de material no equipamento de transporte poderia gerar danos à estrutura do caminhão, com perdas pelas laterais da caçamba do caminhão.

Após a análise dos principais fatores que interferem no dimensionamento dos equipamentos de carga e transporte, e determinação dos possíveis equipamentos a serem utilizados para um empreendimento, é necessário realizar a seleção da melhor combinação dos equipamentos de tal forma que sejam minimizados os custos de produção.

3.5.2 Seleção de equipamentos de carga e transporte

Para a seleção do melhor conjunto de equipamentos a ser adquirido em um projeto de mineração, são propostas algumas ferramentas econômicas para a seleção de projetos. Para fins de análise, os projetos considerados possuem igual capacidade produtiva.

Segundo Costa (1979), após a determinação dos conjuntos de equipamentos de carga e transporte possíveis de operar no projeto da mina, uma técnica muito empregada é a determinação do Valor Presente Líquido (VPL) de cada uma das alternativas durante toda a vida útil da mina, considerando os custos de operação, manutenção e volume de material transportado. Um exemplo de análise poderia ser a representação mostrada na Tabela 3:

Tabela 3: Exemplo de configurações possíveis

| CONJUNTO DE EQUIPAMENTOS | | | Valor Presente Líquido (milhões de R\$) |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| Opção | Carregamento | Transporte | |
| (1) | Pá carregadeira | Caminhão fora de estrada | 206 |
| (2) | Pá carregadeira | Transportador de correia | 150 |
| (3) | Escavadeira (hidráulica) | Caminhão fora de estrada | 110 |
| (4) | Escavadeira (hidráulica) | Transportador de correia | 100 |
| (5) | Escavadeira (elétrica) | Caminhão fora de estrada | 120 |
| (6) | Escavadeira (elétrica) | Transportador de correia | 150 |
| (7) | Retroescavadeira | Caminhão fora de estrada | 170 |
| (8) | Retroescavadeira | Transportador de correia | 130 |

Analisando a Tabela 3, a opção a ser escolhida seria a (4) por apresentar um custo de transporte menor ao longo dos anos de exploração, gerando o maior retorno financeiro possível.

A crítica à utilização do método do VPL para a seleção de equipamentos é que devido à extensa vida útil de uma mineração, é pouco provável que o referido estudo consiga prever com exatidão as mudanças que ocorrerão ao longo dos anos, como aumento dos custos de operação e manutenção por aumento da DMT (distância média de transporte) até a planta de beneficiamento, novas tecnologias, entre outros. Outra crítica que se faz é com relação à falta de organização de sua memória de cálculo. Em Costa (1979), não é apresentada nem uma metodologia para a organização da memória de cálculo do VPL. Assim, grande parte dos fatores utilizados para a avaliação de uma alternativa de conjunto de equipamentos pode se perder com o passar do tempo. Quando é necessário novo processo de aquisição ou substituição de ativos, os dados do passado podem estar incompletos ou até terem desaparecido, gerando um novo processo de aquisição que consome um número de horas desnecessário, que poderia ser otimizado a partir da utilização de dados do passado.

Em Souza (1995) são abordados vários métodos econômicos para a avaliação econômica de projetos de mineração e seleção de equipamentos de mineração. Mais especificamente o autor trata o problema como sendo a seleção ou substituição de ativos físicos (máquinas e equipamentos), de tal forma que cada alternativa possua seus custos de aquisição, operação, manutenção e revenda (residual) além do tempo de vida útil. A partir da aquisição dos dados de cada projeto surge quatro hipóteses.

A primeira hipótese se refere à seleção de uma alternativa dentre um conjunto de alternativas, mutuamente excludentes, com horizontes (vidas úteis) iguais ao do projeto de

mineração. Para tal tarefa, calcula-se o VPL para cada alternativa, e seleciona-se o que possuir menor valor, supondo assim que estar-se-á escolhendo a alternativa que gera menor custo para a empresa. Na realidade, esta possibilidade se aplica em casos muito específicos, pois é pouco provável que todas as alternativas terão vida útil igual ao do projeto de mineração.

A segunda hipótese se refere à seleção de uma alternativa dentre um conjunto de alternativas, mutuamente excludentes, com horizontes diferentes e menores ao do projeto de mineração. Um artifício muito utilizado para se contornar este problema é a utilização de um período de projeto igual ao mínimo múltiplo comum (MMC) do valor das vidas úteis das alternativas. Assim são construídos vários processos de compra e venda do ativo até que no final do período considerado, todos os ativos estarão no final de suas vidas úteis. Esse artifício, em suma, não está errado, porém faz com que a solução do problema saia da realidade. Nestes casos, o mais correto seria utilizar o método do Valor Anual Equivalente (VAE). O VAE por consequência de sua criação, já possui implicitamente a possibilidade de ser usado nesses casos, sem necessariamente ter que se utilizar explicitamente o método do MMC.

A terceira hipótese se refere à seleção de uma alternativa dentre um conjunto de alternativas, mutuamente excludentes, com horizontes diferentes, maiores e/ou menores ao do projeto de mineração. Nessa hipótese, Souza (1995) relata que o mais indicado é a alteração das vidas úteis das alternativas que ultrapassam, passando estas a serem iguais a do projeto e tendo os seus valores residuais alterados para valores equivalentes à data considerada. Assim os projetos passam a ter vida útil igual ou menor a do projeto, possibilitando a utilização do VAE como comparação entre os mesmos.

A quarta hipótese se refere à seleção de uma alternativa dentre um conjunto de alternativas, mutuamente excludentes, com horizontes diferentes em que o projeto de mineração possui horizonte perpétuo. Não muito raro, as minerações têm que desenvolver projetos nos quais o seu horizonte de tempo de vida útil pode ser considerado ilimitado (ou perpétuo), por estarem distantes de facilidades tais como ferrovias ou canais de distribuição de abastecimento. Para tal análise de seleção, tanto o VPL quanto o VAE podem ser utilizados, desde que em suas fórmulas sejam consideradas aproximações matemáticas cabíveis para um período de tempo próximo ou igual a infinito.

De maneira geral, Souza (1995) elaborou a Tabela 4 como síntese para o método mais apropriado a ser utilizado na seleção de projetos de mineração.

Tabela 4: Métodos básicos na seleção de projetos

| ALTERNATIVAS COM: | |
|--------------------------|------------------------------|
| MESMO HORIZONTE | HORIZONTES DIFERENTES |
| Método VPL | Método VAE |

Fonte: Souza (1995).

Para Souza (1995), a Tabela 4 serve como referência dos métodos mais apropriados, porém, segundo o autor, qualquer método de análise econômica pode ser utilizado (tais como VAE, VPL, TIR, VFL, entre outros). Desde que sejam corretamente utilizados, os resultados destes métodos devem sempre ser os mesmos.

A partir da seleção da possível alternativa que provém maior taxa de retorno para a empresa, outras duas análises econômicas ainda são cabíveis de serem realizadas. Este fato é decorrente das incertezas existentes nas estimativas dos custos e ganhos, pois é impossível suas previsões se apresentarem com exatidão para períodos de tempo relativamente grandes.

A primeira é a Análise de Sensibilidade, que consiste em determinar quais são as variáveis críticas ou estratégicas de um projeto que influenciarão o retorno esperado. Após determinar quais são as variáveis mais importantes, limites são determinados para saber até quando uma variação em um parâmetro pode ou não inviabilizar um projeto do ponto de vista econômico. Uma crítica que Souza (1995) faz a essa análise econômica é que, muitas vezes, existem correlações entre uma ou mais variáveis, assim uma alteração em uma variável tem efeito direto em outra, porém este método não prevê estas ocorrências, necessitando de outros métodos estatísticos para se tentar relacioná-las.

A segunda é a Análise de Risco, que tem por objetivo acrescentar incertezas ou riscos às variáveis críticas dos projetos de tal forma que vários cenários, tanto otimistas quanto pessimistas, possam representar as possíveis flutuações da realidade, resultando em vários cenários de valores de TIR, VAE, entre outros. Os métodos utilizados para se ajustar os parâmetros e os resultados são:

- **Payback ajustado ao risco:** consiste na diminuição do tempo de *payback* para situações em que se tenha um alto grau de risco. Essa técnica é muito criticada porque possui um alto grau de subjetividade;

- **TIR ajustada ao risco:** consiste em se tentar aumentar a TIR dos fluxos de caixas futuros. Este método é criticado, pois assume que os riscos aumentam com o passar do tempo, fazendo com que as previsões dos fluxos de caixa futuros tenham muita incerteza e pouca influência na decisão;
- **Técnica das três estimativas:** consiste na realização de intervalos de variação para as variáveis críticas gerando a hipótese pessimista, base e otimista. A crítica a esta metodologia recai sobre a probabilidade de todas as variáveis de uma hipótese serem iguais. Mas estes três casos extremos dificilmente acontecem na realidade;
- **Variáveis estratégicas ajustadas ao risco:** consiste em determinada situação de risco considerar valores conservadores para uma ou mais variáveis críticas. Essa técnica possui a desvantagem de ao considerar valores muito baixos (conservadores) fazer com que a maioria dos projetos possam ser rejeitados, perdendo-se boas oportunidades de negócio.

Outros dois métodos são considerados por serem mais utilizados na análise de risco e possuírem maior robustez no modo como são construídas as suas considerações perante as incertezas: o método analítico e a simulação de Monte Carlo.

O método analítico consiste, assim como na análise de sensibilidade, em criar intervalos de valores para as variáveis críticas do projeto, porém associa uma probabilidade para cada intervalo de valor dentro dos possíveis valores das variáveis críticas. Após criação da matriz de valores e probabilidades associadas, são geradas todas as combinações possíveis para os intervalos e valores considerados. De posse destes cenários, são avaliadas suas ocorrências de sucesso ou fracasso, assim como as probabilidades associadas à cada uma destas, gerando uma resposta final relacionando o percentual de probabilidade de aceitação do projeto.

O problema de utilizar o método analítico é quando o projeto apresenta diversas variáveis críticas com muitos valores ou até mesmo infinitos, impossibilitando ou inviabilizando a utilização deste método. Em tais casos a utilização do método de simulação de Monte Carlo se faz presente para contornar tal problema. O método consiste em, a partir de um conjunto de amostras significativas e independentes de retornos do projetos, calcular parâmetros estatísticos (como a média, desvio padrão, entre outros). O procedimento de seleção das respostas é realizado de forma aleatória, para garantir a independência das

respostas. Esse processo de seleção aleatória de respostas e cálculo dos parâmetros estatísticos é repetido um número de vezes de tal forma que os dados selecionados possam ser tratados estatisticamente e tenham representatividade para se fazer inferências corretas a respeito da população de respostas possíveis para o projeto.

Até o presente momento do trabalho, as características mais relevantes para a seleção de equipamentos, com base em fatores e métodos econômicos, foram revisadas e relacionadas, a partir do estudo da literatura técnica. Elementos específicos, como condições sociais, geográficas, políticas e ambientais, também têm um grande impacto na determinação do sucesso de um projeto, cabendo estudos específicos para cada um destes itens, impossibilitando a elaboração de um estudo mais genérico e abrangente, foco desta parte do trabalho.

Cabe ressaltar que, na maioria dos casos, as técnicas e métodos de seleção de equipamentos, anteriormente descritas, são suficientes para os casos em que, na região onde se realizará a exploração mineral, não exista grande número e/ou variedade de equipamentos a serem analisados, devido a restrições da região como disponibilidade de fornecedores ou o método de lavra a ser empregado exigir a utilização de equipamento único.

Na maioria dos casos, devido à importância da atividade econômica e inúmeros investimentos por parte das empresas fornecedoras de equipamentos, hoje existe uma grande variedade de equipamentos à disposição dos compradores e que possuem características muito próximas das que se deseja para a operação em mineração.

A segunda parte da revisão bibliográfica visa à análise das metodologias de auxílio à tomada de decisão, assim como suas aplicações. Destaca-se que a tomada de decisão para a seleção de equipamentos de mineração não é explorada de forma consistente e científica na literatura pesquisada, o que motivou o presente trabalho.

3.6 Discussão sobre a aplicação da metodologia AMD

De forma a melhor entender do que tratam os métodos de auxílio à decisão é importante ter em mente o que se pode esperar deles. Por definição, segundo Figueira *et al.* (2005), o auxílio à decisão é uma ferramenta para ajudar na atividade de uma pessoa que, através do uso de modelos explícitos, mas não necessariamente formalizados, obtém elementos de resposta propostos pelos *experts* do problema, que servem para clarificar a decisão e apontar alguma recomendação. Estes métodos são denominados Auxílio Multicritério à Decisão (AMD) ou *Multicritéria Decision Aid* (MCDA) em inglês.

Após essa discussão pode-se destacar que o processo de decisão objetiva o estabelecimento, com base científica, de trabalhar com hipóteses, formulações e proposições que serão submetidas ao julgamento dos vários atores envolvidos no processo de decisão. De acordo com cada caso, o auxílio à decisão pode contribuir para (FIGUEIRA *et al.* 2005):

- Analisar o contexto de tomada de decisão, identificando os atores, as várias possibilidades de ação, suas consequências e seus riscos;
- Organizar e/ou estruturar a forma como o processo de decisão se desenvolve, a fim de aumentar a coerência entre os valores subjacentes aos objetivos e metas, e decisão final a ser alcançada;
- auxiliar os atores a cooperar propondo chaves para uma melhor compreensão mútua e da elaboração de um quadro favorável ao debate;
- elaborar recomendações usando resultados tomados de modelos e procedimentos computacionais concebidos no âmbito de uma hipótese de trabalho;
- participar na legitimação da decisão final.

Um aspecto que se deve levar em consideração no momento de adoção de um processo de decisão é a análise referente à utilização de um método de auxílio monocritério ou multicritério.

Muitas vezes, mesmo quando o processo de decisão é de responsabilidade de apenas uma pessoa, são levados em consideração muitos pontos de vista referentes a fatores como: recursos financeiros, recursos humanos, aspectos ambientais, atrasos, segurança, qualidade,

ética entre outros. Assim, mesmo sendo um problema de pequeno porte ou decidido por poucas pessoas, leva-se em consideração vários critérios.

Como riscos à adoção de métodos monocritérios, pode-se ressaltar que (FIGUEIRA *et al.*, 2005):

- leva à negligência de aspectos da realidade;
- facilita o estabelecimento de equivalência que leva a esconder naturezas distintas;
- tendem a apresentar características de um sistema de valor particular como objetivo.

Do lado oposto, a abordagem multicritério contribui para evitar tais perigos por que

- delimita o espectro de pontos de vista que possam estruturar o processo de decisão, com respeito aos atores envolvidos;
- constrói uma família de critérios que preserve, sem nenhuma conversão fictícia, o significado concreto original das respectivas avaliações;
- facilita o debate sobre o respectivo papel (peso, veto, nível de aspiração, entre outros) do nível de rejeição que cada critério pode ser chamado a desempenhar durante o processo de apoio à decisão.

Assim sendo, mesmo em situações em que seja mais bem empregada uma avaliação ou decisão tendo como base o auxílio monocritério, muitas vezes, esses mesmos atores acabam realizando intuitivamente (cognitivamente) uma avaliação multicritério, com base no maior número de variáveis que os problemas reais envolvem e que, muitas vezes, podem ser fatores decisivos não somente relativo às questões financeiras.

3.7 Revisão e classificação dos artigos consultados sobre o AMD

Na literatura especializada sobre a tomada de decisão em cenários complexos, com o auxílio de metodologias originadas no AMD, fica clara a divisão dos artigos em três possíveis categorias.

Na primeira categoria, têm-se os artigos que tratam da fundamentação teórica e axiomas do AMD nos níveis de abordagem, metodologia e métodos utilizados, que relatam

sobre a natureza técnica e o estudo das metodologias que compõem essa técnica. Esse assunto está apresentado na seção 3.7.1.

Na segunda categoria, têm-se os artigos que tratam da validação conceitual e operacional do uso do AMD em problemas do mundo real, relatando os sucessos, fracassos e experiências de aplicação para o auxílio à solução de problemas. Uma revisão desses artigos é apresentada na seção 3.7.2.

Na terceira e última categoria (seção 3.7.3), são analisados os artigos que tratam sobre as experiências de utilização do AMD na mineração.

3.7.1 Fundamentação teórica e axiomas do AMD nos níveis de abordagem, metodologia e métodos utilizados

Steuer *et al.* (1996) tratam do impacto da utilização da metodologia AMD como ferramenta de apoio à tomada de decisão. Foram analisados um total de 1.216 artigos, 217 livros, 31 jornais especializados e 143 conferências, publicados entre 1987 e 1992, a partir da mesma temática. Pela análise desse trabalho, verifica-se que essa metodologia é muito usada em países do hemisfério norte, com grande chance de aplicação também no Brasil.

Eom e Min (1999) fizeram um estudo empírico com 498 artigos que tratavam sobre Sistemas de Suporte a Decisão (SSD) entre os anos de 1991 até 1995. Como resultado, foram identificados quatro tópicos majoritários em que os SSD geram contribuição em pesquisas: suporte a grupos, execução, modelo de gestão e *design*. Para dar suporte a estes tópicos, quatro áreas do conhecimento foram identificadas: inteligência artificial, ciência cognitiva, ciência organizacional e auxílio multicritério à análise de decisão. Assim, foi possível identificar as áreas principais do conhecimento que trazem contribuições diversas para a metodologia AMD.

Roy e Mousseau (1996), levantaram a questão de como os critérios se relacionam e se pode existir situações em que um critério pode ter sua preferência diminuída em relação a outro. Os autores também analisam a equivalência entre duas ou mais alternativas. Diferentes metodologias do AMD possuem compensações para que os critérios de maior peso não sejam os itens que unicamente determinam a resposta de uma análise multicritério.

Segundo Stewart (1996), para que a metodologia AMD seja empregada é necessário que as alternativas possuam igual probabilidade de serem escolhidas, significando que não existem alternativas dominantes, fato que não justificaria a aplicação da metodologia de decisão porque a decisão seria muito fácil de ser tomada. Outras considerações são feitas a respeito das alternativas a fim de se utilizar o AMD, determinando as mesmas como sendo independentes e plenas a ponto de serem capazes de resolver o problema.

Para Roy (1985) *apud* Perny (1996), são levantados ganhos importantes através da utilização do AMD, não apenas com a representação de um problema de uma maneira multidimensional, mas também ressaltando que:

- o processo de análise de decisão ajuda a levantar informações críticas a respeito do problema;
- a metodologia ajuda a aprender em quais dimensões o problema tem ramificações;
- a metodologia possibilita diferentes formulações válidas para um problema;
- em problemas complexos, as análises de subitens podem ajudar a compreendê-lo melhor;
- é possível utilizar a informação da maneira como ela aparece na realidade, sem ter que fazer considerações artificiais.

Em Lootsma (1996), faz-se referência ao modo de operação a que a metodologia AMD está subordinada. Se apenas uma pessoa tem que tomar uma decisão, provavelmente ela a tomará da forma mais simples e direta quanto possível. O processo convencional de tomada de decisão se dá através da análise financeira, devido ao fato de que uma pessoa não possui tempo suficiente para analisar todas as outras variáveis não financeiras. À medida que as decisões vão se tornando cada vez mais complexas e necessitam de um maior número de pessoas para se tomar uma decisão, ferramentas mais complexas são necessárias para auxiliar tal processo. Mesmo após mais de trinta anos de estudos da metodologia AMD, ainda não é possível provar se haverá economia financeira e nem em que situações ela é considerada um padrão para aplicação, mesmo porque ela não possui em seus fundamentos estas prerrogativas. Assim, Lootsma (1996) ressalta que maiores estudos sobre o assunto sejam realizados para que esta tecnologia seja melhor aceita pelo mercado.

Zapatero (1997) relaciona a avaliação de ferramentas computacionais de auxílio à tomada de decisão que empregam em sua estrutura metodologias AMD. Os *softwares* estudados foram: Criterium, Expert Choice, Logical Decision, VIMDA, VISA e Quattro Pro. Estes programas foram avaliados pelo tempo necessário para se chegar a uma conclusão e pela pontuação dada pelos seus usuários de acordo com critérios previamente estabelecidos. Dentre os seis produtos, o VISA e o Expert Choice foram considerados os melhores por chegarem a resultados mais próximos dos desejados pelos agentes decisores.

Em Fishburn e Lavallo (1999), são pontuados alguns itens que ajudam a entender a importância da utilização do AMD e as áreas de estudo dentro da metodologia:

- o papel da utilização multicritério em modelos não lineares;
- a análise de sensibilidade e melhor acomodação de informações vagas ou imprecisas em situações de decisão multidimensional;
- a utilização de diferentes metodologias em diferentes estágios do processo de tomada de decisão;
- a melhora na interação de usuários com sistemas de suporte à tomada de decisão;
- melhora no entendimento das limitações do julgamento humano, e a metodologia de como são tomadas decisões em cenários complexos.

Bouyssou (1990) trata sobre a importância da fase de construção dos critérios de avaliação necessários para as metodologias multicritério, assim como a importância do envolvimento do maior número de pessoas afetadas diretamente pelo projeto durante a fase de definição dos critérios. É de extrema importância que estas pessoas conheçam por que fazer determinadas escolhas de avaliação e quais seriam as consequências de tais ações.

Henig e Buchanan (1996) fazem e tentam responder duas perguntas principais: quais são os recursos necessários para um bom processo de tomada de decisão quando confrontado com múltiplos critérios e o que se deve esperar de resultado de um método AMD. A resposta encontrada foi que o resultado de um processo de decisão deve ser o entendimento do agente decisor de suas preferências e a expansão do quadro de alternativas antes que uma alternativa seja escolhida. Assim, de fato, a escolha será a melhor possível de acordo com as preferências e experiências deste agente responsável por tomar a decisão.

Milkman *et al.* (2009) trazem a discussão de como o processo de decisão pode ser melhorado. Para tal tarefa, eles relatam a importância do estudo deste item devido ao fato de que erros de decisão podem custar muito caro para as empresas, e para o futuro os erros podem ser mais caros ainda, devido a fatores não previstos no momento de decisão. Este fato faz com que os agentes decisores sejam, em geral, bastante receptivos para estudar novas maneiras de se tomar uma decisão. Outro item comentado foi o fato de as pessoas tomarem muitas vezes uma decisão com base apenas na intuição. A intuição pode ser um grande aliado no processo de tomada de decisão, porém com a elaboração de novos estudos e ferramentas para a área de decisão, é possível tentar minimizar os erros associados à intuição e novas alternativas para situações complexas e importantes para as empresas.

Brugha (2000) faz uma análise comparativa da utilização do processo de apontamento de prioridades e o mapeamento cognitivo para os estágios iniciais do AMD de definição de variáveis e de estruturação de critérios. Como conclusão ele afirma que o processo de apontamento de prioridades pode ser aplicado em casos específicos, uma vez que é mais vantajoso pois demanda menos recursos (tempo). Outra questão interessante que Brugh levanta é a vantagem de se utilizar a metodologia AMD em vez de métodos de Pesquisa Operacional mais tradicionais, que muitas vezes, são “caixas pretas” em que não se sabe ao certo como o resultado foi encontrado. Por outro lado, o AMD dá completa visão para o agente decisor de como a resposta foi encontrada.

Corner, Buchanan e Henig (2001) estudaram o problema de formulação, no que tange a perspectiva e descritiva da fase de formulação da estrutura de um problema, fase esta presente em todos os métodos da metodologia AMD. Os autores concluem que é interessante para o agente decisor usar da interação das duas técnicas para a elaboração de um problema, a fim de melhor entendê-lo. Porém, é de suma importância que esta fase seja dinâmica a ponto de se adaptar o mais rápido possível às demandas da situação.

Podinovski (2002) aborda, em seu trabalho, a análise da importância dos critérios quantitativos para os problemas envolvendo o AMD. Como resultado, o autor faz várias considerações de caráter comparativo para os critérios, porém deixa em aberto a resposta à pergunta de em quais situações é preferível utilizar a análise quantitativa junto da qualitativa, pois este julgamento apenas pode ser feito pelo agente decisor na avaliação de seu problema.

Hallerbach e Spronk (2002) defendem a tese de que as ferramentas e metodologias AMD podem ser aplicadas na análise financeira. Mesmo não fazendo nenhum estudo de caso em específico sobre a aplicação de algum método AMD em um caso real, os autores discorrem sobre a natureza da análise financeira e como os dois temas (finanças e AMD) têm muito em comum, devido ao fato que nas finanças muitos fatores qualitativos devem ser analisados para se mensurar os riscos.

Wenstop (2005) trata sobre a importância das emoções durante o processo de decisão. Como toda metodologia AMD envolve a elaboração de critérios e a tomada de decisão pelos agentes decisores, é proposto no trabalho a necessidade de compreensão do fator emocional e da subjetividade nos métodos AMD para se tomar decisões de forma mais racional.

No trabalho de Grabisch (2008), é feita uma análise sobre o problema de se pontuar alternativas, quando elas são avaliadas com respeito a vários critérios, em uma escala finita ordinária. É mostrado que, em geral, esta escala de avaliação deve ser refinada ou escolhida para que seja capaz de representar as preferências do agente decisor. Este problema decorre do fato de que se a escala não for corretamente construída, é possível que a resposta da avaliação seja fortemente enviesada pelos intervalos escolhidos, o que não é uma característica boa, pois a resposta deve ser a mesma independente da escala.

Salo, Gustafsson e Ramanathan (2003) discutiram sobre o possível papel da utilização do AMD na aplicação de análises envolvendo previsões. Nestas previsões, foram considerados casos que tinham como base o julgamento, avaliação de projetos e de portfólios de projetos de pesquisa e desenvolvimento. Como maior contribuição para esta área, está o fato de que o AMD possibilitou rigor e transparência para o processo de previsão.

Čančer e Mulej (2010) propõem uma nova teoria para apoiar a metodologia AMD, a Teoria do Sistema Dialético (DST- *Dialectical Systems Theory*). Os autores também propõem um esquema resumido das principais etapas que compõe a maioria dos métodos AMD. Esse esquema é apresentado na Figura 11.

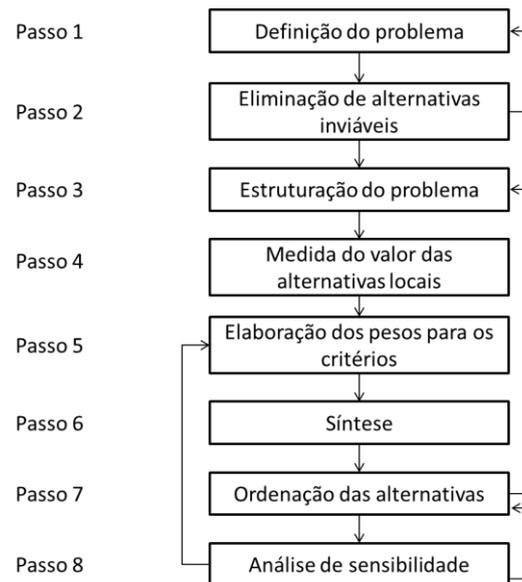


Figura 11: Esquema de um método AMD genérico
 Fonte: Adaptado de Čančer e Mulej (2010).

O DST complementa os passos 1, 2 e 3 da Figura 11, porque propõe as seguintes etapas:

- 1) Definição de um propósito, isto é, a criação de algo novo, contra alguma ideia há muito consolidada;
- 2) Uso de nova abordagem para realizar o propósito;
- 3) Definição precisa de quais são os objetivos e as tarefas do sistema como um todo;
- 4) Definição precisa de como as tarefas deverão ser realizadas;
- 5) Cobertura de tudo o que é importante;
- 6) Uso da habilidade holística para se criar um ambiente cooperativo e criativo (através do pensamento dialético);
- 7) Diálogo e organização da cooperação;
- 8) Atualização contínua;
- 9) Avaliação de conhecimentos adquiridos e estado emocional do grupo;
- 10) Evolução do processo e utilização da intuição sobre estas mesmas etapas.

Karacapilidis *et al.* (2003) fazem uso do *software* HERMES para avaliação do processo de decisão através da metodologia AMD. Neste trabalho, é também relatado o uso da Teoria dos Jogos na aplicação em problemas de decisão. A Teoria dos Jogos trata de tomada de decisões em que existam mais de um agente decisor que tenham opiniões distintas.

Vale lembrar que, na utilização do AMD, deve-se ter cuidado com as opiniões controversas dos agentes decisores.

Park (2004) analisou como informações incompletas a respeito dos critérios das alternativas e dos pesos dos critérios podem influenciar cenários de decisão em que deva prevalecer a certeza. Este estudo mostra que com um bom conhecimento da metodologia e dos critérios adotados, é possível, com um certo grau de confiança, tomar decisões em cenários não tão bem definidos em termos matemáticos ou de classificação de alternativas.

White e Holloway (2008) discutem até que ponto o facilitador deve fazer perguntas e quais perguntas fazer, em seguida, para o grupo de agentes decisores. O objetivo é saber se será possível chegar à alternativa mais preferível, de maneira que consuma menor tempo, esforços e expectativas e determinar o melhor momento para interromper os questionamentos.

3.7.2 Validação conceitual e operacional do uso do AMD em problemas reais

Lootsma e Schuijt (1997) estudaram a aplicação das metodologias *Analytic Hierarchic Process* (AHP), *Simple Multiattribute Rating Technique* (SMART) e *Elimination et Choix Traduisant la Réalité* (ELECTRE) para o problema de determinação de local para a instalação de usina nuclear. Como conclusão, ressaltam que a utilidade aparente de se usar mais de uma metodologia AMD para se resolver um mesmo caso tem por objetivo minimizar problemas relacionados à formulação do problema, geração de alternativas e critérios, ajuda na elucidação das preferências do julgamento humano e na decisão do resultado final. Porém estes fatos nem sempre são eliminados com a utilização de mais de um método AMD, pois se a pessoa utilizar pela primeira vez estas metodologias, o agente decisor provavelmente terá seu julgamento enviesado pela metodologia analisada anteriormente. Assim, a utilização de várias metodologias para se minimizar os riscos de se falhar em um processo de decisão nem sempre funciona.

Belton e Ackermann (1997) descrevem sua experiência de trabalho com os softwares COPE e VISA, em um hospital do Reino Unido, para a realização de um *workshop* destinado a mapear o fluxo do processo e os pontos mais importantes do hospital.

Haven (1998) apresenta uma adaptação para uma metodologia multicritério, a *Fuzzy Multicriteria Analysis Method* (FMCAM) que, diferentemente das metodologias tradicionais, que ordenam as possíveis alternativas, compara as alternativas umas com as outras. Como estudo de caso, o autor comparou três projetos de investimento que possuíam valor presente líquido igual ou muito próximos.

Ensslin *et al.* (2008) aplicam a metodologia MCDA-C para a avaliação do capital intelectual de uma empresa, que é um bem intangível e de extrema importância, que deve ser monitorado. Assim, foi proposta uma metodologia para mapear as áreas de conhecimento de relacionamento interpessoal na empresa a fim de se saber como o conhecimento está sendo gerenciado na empresa e quais os resultados e benefícios que esse conhecimento está gerando ou deveria gerar para a empresa.

Alencar e Almeida (2010) propõem a utilização em conjunto dos métodos PROMÉTHÉE II, IV e GAIA para a seleção de pessoas que farão parte de um grupo destinado à realização de um projeto da indústria de construção civil. Em Alencar e Almeida (2008), é utilizada a metodologia ELECTRE IV para a ordenação das alternativas e a metodologia *VIP analysis* para selecionar as melhores alternativas num estudo referente à seleção de fornecedores para um projeto.

Almeida (2007) faz uso dos métodos Função de Utilidade e ELECTRE I para a elaboração de um modelo que pretende ajudar na seleção de contratos de serviços terceirizados.

Em Barros (2006), foi utilizado o método MACBETH para a avaliação do corpo docente de uma instituição de ensino superior do Estado de Sergipe (Brasil), a fim de tornar a instituição mais competitiva a partir da visualização do trabalho de avaliação, tornando seus docentes mais conscientes a respeito da visão organizacional.

Dutra (2008) utiliza a metodologia MCDA-C para a avaliação do desempenho das Secretarias de Desenvolvimento Regionais do Estado de Santa Catarina, criando um referencial com 53 indicadores de desempenho, oportunidades de melhoria e recomendações de ações. Vale destacar um alerta do autor que discorre sobre o sentido da avaliação de desempenho. A avaliação do desempenho através da metodologia AMD não deve ser considerada como um instrumento de apoio para punição, mais sim para apoio à avaliação dos pontos fortes e fracos. Do contrário, a utilização exclusiva da metodologia para apontamento

de itens deficitários poderia dar oportunidade para objetivos obscuros e gerar a resistência de sua utilização para avaliações futuras.

Henig e Katz (1996) desenvolveram em conjunto com uma empresa, uma modelagem multicritério para ajudar na seleção de projetos que possuem o maior potencial de lucro para ela. Os autores permitiram que fosse criado um método de avaliação e reavaliação dos critérios e seus atributos a serem avaliados pelos avaliadores da empresa, permitindo a formalização e percepção da empresa de como o processo de decisão se realizava como um todo.

Hadley, Schoner e Wedley (1997) fizeram um estudo comparativo do método AHP e uma de suas variantes para saber o grau de diferença entre os resultados obtidos em um estudo de caso. O estudo trata da avaliação feita por um grupo de agentes de seguros a respeito do que acreditavam serem itens de possível incentivo em seus trabalhos. Segundo os autores, o trabalho foi motivado pela existência de outros artigos relatando a deficiência da metodologia AHP em relação à maioria das metodologias. O resultado do trabalho indicou que a metodologia AHP modificada gerou resultados satisfatórios. Os autores concluíram que não existe uma metodologia que tenha um desempenho melhor do que as outras em todos os casos, mas sim que se deve estudar bem para se escolher a metodologia que terá maiores chances de gerar bons resultados e, se possível, tentar a comparação através da utilização de mais de uma metodologia.

Em Jannuzzi, Miranda e Silva (2009), é proposta a utilização do AMD para Políticas Públicas relacionadas a empresas e serviços públicos brasileiros. Para tal é utilizado o programa computacional PRADIN, que tem como base o método Prometheé II, desenvolvido a partir da demanda da Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, a partir de 2004.

Lima *et al* (2009a) trabalharam com a aplicação da metodologia MCDA-C para a avaliação dos diversos riscos percebidos para a mortalidade precoce de micro e pequenas empresas, constatadas perante 100 empresas consultadas através da Junta Comercial do Estado de São Paulo. Os autores concluíram que se as empresas consultadas, que foram extintas, tivessem feito um planejamento prévio tendo cuidado na escolha do capital humano, cautela na construção do relacionamento com os clientes e parceiros comerciais e contato com

uma ferramenta de apoio a decisão, teriam tido maiores chances de sobreviver ou até mesmo chegado à conclusão que não era vantajoso a criação da empresa.

Mélon *et al.* (2009) relatam suas experiências a partir de trabalho realizado com a empresa venezuelana de energia EDC para a seleção de portfólio de projetos visando a expansão da rede de distribuição elétrica da cidade de Caracas. Foi utilizado o método ANP junto aos gerentes de seleção de projeto, gerando uma análise com os 15 principais fatores identificados pelos gerentes, destacando-se o custo e o nível de automação do projeto. Os gerentes da EDC salientaram que o ANP foi muito útil, pois obteve resultados satisfatórios com um nível baixo de recursos necessários.

Em Moraes e Almeida (2006) foi feito um estudo da aplicação da família dos métodos PROMETHEÉ (I a VI) para a análise e priorização das alternativas de redução de perdas e desperdícios de água do sistema de abastecimento da cidade de Carnaíba (Pernambuco). Os autores concluíram que a metodologia empregada teve relevância para a priorização das alternativas; porém, em situações semelhantes, outras alternativas poderiam ser analisadas de acordo com a nova situação, gerando assim uma nova resolução do problema.

Monnikhof e Bots (2000) relatam as suas experiências em dois casos de aplicação da metodologia AMD na elaboração de políticas públicas na Holanda. Um deles trata do aparente sucesso na avaliação de um plano para a construção de estradas interestaduais, e o outro, de um caso de fracasso, que envolve a tentativa de priorizar ações da prefeitura da cidade (vila) de DeBilt. Para a criação de uma metodologia AMD foi sugerido que:

- os critérios devem ter foco no processo e devem ser feitos de forma explícita;
- na estrutura e apresentação, os impactos devem ser separados da definição de prioridades, o que não as impede de serem discutidas durante o *brainstorming*;
- o AMD proporciona uma estrutura, mas não determina resultados de decisão.

Segundo De Bruijn e Tem Heuvelhof (2000) *apud* Monnikhof e Bots (2000), a adoção do AMD em políticas públicas é apropriada pelos seguintes motivos:

- o processo de *design* da estrutura em si já é um processo de negociação onde todos os *stakeholders*¹³ são envolvidos;

¹³ São todas as pessoas envolvidas em um processo, podendo ser temporário (um projeto) ou duradouro (funcionários de uma empresa).

- o processo é dinâmico, no sentido em que ele permite inúmeras interações, se necessárias;
- todos os *stakeholders* têm oportunidade de contribuir com conhecimento e são incentivados para tal;
- não existe um conhecimento dominante, onde cada participante pode negociar a relevância de uma informação ou conhecimento.

Os autores citam uma metodologia alternativa para a aplicação do AMD em políticas públicas, em que o AMD seria uma metodologia para dar estrutura e visão global do problema em vez de dar pesos às opções e determinar prioridades. Esta avaliação é melhor realizada pelos participantes do debate de idéias. A metodologia seria utilizada em várias partes do processo de decisão, de forma simples, rápida e compreendida pelos participantes de seus resultados, pois o tempo de resposta é mais importante do que a precisão da resposta.

Bots e Hulshof (2000) participaram de dois trabalhos envolvendo o método SMART para a formulação de políticas públicas para o sistema de saúde holandês, em que o primeiro se referia a levantar quais eram as principais doenças enfrentadas pela saúde e o segundo criar uma agenda a fim de combater estes problemas. Os dois casos demoraram um período de aproximadamente dois anos para serem iniciados e finalizados, necessitando apenas de 10 h à 15 h de reunião total com os participantes, além das horas gastas para se elaborar e analisar o material discutido. Foi constatado que, em ambos os casos, o resultado foi satisfatório, principalmente pelo fato de se preparar previamente e com rigor as reuniões ocorridas e pelo fato de todos os seus participantes, com alto grau de conhecimento em saúde, terem comparecido e participado efetivamente das reuniões.

Paschetta e Tsoukiàs (2000) relatam a aplicação do método ELECTRE III para a seleção de um software de informação geográfica (GIS) em uma empresa situada em Torino, Itália. É relatado que a metodologia foi implementada de forma demorada, porém os agentes decisores reconheceram que sem o procedimento não seria possível o reconhecimento de fatores que classificariam as alternativas como boas candidatas.

Triantaphyllou (2001) estudou o método AHP e suas variantes em 22 estudos de casos presentes na literatura com o intuito de analisar as possíveis inconsistências da metodologia e suas consequências no tocante ao resultado final. O motivo gerador principal do estudo foi o fato de o método AHP ter sido um dos primeiros métodos do AMD e de ser um dos mais

utilizados, estudados e criticados até então. Como resultado, o autor conclui que algumas inconsistências e possíveis discordâncias são possíveis com a utilização do AHP e algumas de suas variantes, porém até aquela data não existia método em que isso não fosse gerado, sendo completamente perfeito.

Bana e Costa (2001) aplicaram o método MACBETH (e seu respectivo software) para a análise das opções de políticas conflitantes para o projeto de investimento em rodovias intermunicipais da região metropolitana de Lisboa. O projeto trabalhou com um grupo de 18 prefeitos das cidades diretamente afetadas pelo projeto, de tal forma que, ao final, foi selecionado um conjunto de critérios mais importantes para o grupo e que facilitaria a negociação dos investimentos.

Rosqvist (2001) trata da utilização dos princípios do AMD para o auxílio na determinação de fatores relevantes na elaboração do *life cycle profit* que um conjunto de projetos podem gerar, elegendo assim o projeto mais importante para o agente decisor. Como resultado, Rosqvist propõe que o agente decisor crie um série de critérios de tal forma que sejam considerados riscos e incertezas do projeto a ponto de que o decisor se sinta satisfeito.

Em Kangas *et al* (2001), é analisada a utilização de vários métodos da metodologia AMD para a aplicação no planejamento da indústria florestal da Finlândia. Como método auxiliar é utilizada a matriz SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats*, em português forças, fraquezas, oportunidades e ameaças) para a fase inicial de construção, identificação e análise de possíveis alternativas para solução dos problemas. Como resultado é proposta a utilização de uma metodologia híbrida para cada um dos possíveis problemas relacionados à engenharia florestal, sendo pouco provável o sucesso de uma única metodologia para o auxílio da mesma.

Lima *et al* (2009b) utiliza o fluxo de caixa descontado e o software MACBETH para a avaliação de três pequenas empresas. A metodologia empregada junto com o software de apoio ao AMD (MACBETH) teve por objetivo a avaliação qualitativa das empresas, pois em casos de avaliação de grandes empresas, apenas são analisados fatores quantitativos (financeiros), que não pode ser considerado unicamente para pequenas empresas em desenvolvimento, em que não se sabe quais serão os lucros reais possíveis para o futuro.

Zopounidis e Doumpos (2002) analisam vários estudos de caso em que métodos da metodologia AMD foram aplicados, e em que circunstâncias, justificando assim sua teoria de

que várias metodologias AMD podem ser aplicadas no setor de análise financeira, ressaltando que os principais ganhos seriam:

- 1) estruturação de problemas complexos de avaliação;
- 2) a introdução tanto de fatores quantitativos (relações financeiras), quanto de critérios qualitativos no processo de avaliação;
- 3) a transparência no processo de avaliação, possibilitando boa argumentação para a decisão financeira;
- 4) a introdução de uma metodologia científica sofisticada, flexível e realística no processo de tomada e decisão financeira.

No trabalho de Xu e Yang (2003) é analisada a utilização do programa computacional denominado IDS (*Intelligent Decision System*, ou Sistema de Decisão Inteligente) que tem como base o AMD (sem um método em específico) em pequenas e médias empresas (menos de 50 funcionários) nos seguintes quesitos: liderança, política e estratégia, pessoal (política e gestão), parcerias e recursos, processos, resultados de clientes, resultados sociais e resultados de desempenho essencial. Esta ferramenta, entre outros fatores, teve como principal objetivo o auto assessoramento da empresa a fim de comparar seu desempenho atual com o do passado e em relação às empresas que são referências em sua área de direta concorrência, assegurando assim um contínuo melhoramento.

Hyde *et al* (2003) fazem uma análise da metodologia PROMÉTHÉE no que diz respeito ao fato desta não considerar as incertezas associadas a cada critério. Para tanto, foram realizadas análises de seis estudos de caso referentes à seleção de energias renováveis considerando as conclusões com e sem a análise de incertezas. Como resultado foi entendido que ao se incluir as incertezas dos critérios e as respostas dos agentes decisores, é possível se chegar a uma resposta diferente da original se o nível de incerteza for muito alto.

Burnaz e Topcu (2006) relatam suas experiências com a aplicação do método ANP para a avaliação da melhor localização de uma unidade de varejo têxtil na Turquia, avaliando as opções de instalá-la em um centro comercial mais tradicional como nas áreas de comércio mais antigas da cidade, ou em um *shopping center* em um local mais moderno e mais valorizado. Como resultado mais importante, foi identificada uma metodologia de elaboração da pesquisa composta por três estágios:

1. desenvolvimento do escopo do projeto, em que foram realizados *worshops* com os gerentes da empresa;
2. avaliação/comparação onde um questionário de comparação pareada foi elaborado e respondido pelos agentes decisores e
3. análise através do *software* Super Decision. Em particular vale ressaltar a impressão que os autores tiveram no primeiro e segundo estágios, que foram complicadas e demandaram muito tempo.

Montibeller *et al* (2006) analisam a utilização conjunta da ferramenta de “planejamento de cenários” (cenários futuros) com a metodologia AMD para fornecer suporte à tomada de decisões estratégicas nas empresas com suporte do *software* VISA. Dois estudos de caso foram desenvolvidos: um relativo a um vendedor de seguros na Inglaterra e outro a uma empresa de especulação imobiliária de compra e venda de terrenos na Itália. A partir da aplicação do planejamento de cenários em conjunto com o AMD foi possível aos agentes decisores esclarecer a visão de futuro destas empresas, ajudando a entender suas preferências e estratégias.

Tervonen e Figueira (2008) falam sobre o método SMAA (*Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis*, ou Análise de Aceitabilidade Estocástica Multicritério) que tem como base o AMD. Esta metodologia tem como um de seus pontos fortes a possibilidade de se utilizar informação imprecisa, incompleta ou duvidosa. Em suas análises foram estudados nove estudos de caso, as quais utilizavam as três metodologias SMAA (I, II e III). O estudo não determinava se o SMAA era melhor que o AMD convencional, porém um vem a complementar o outro.

Em Dooley *et al* (2009), foi analisada a aplicação da metodologia AMD na indústria agropecuária da Nova Zelândia em três áreas de estudo (uso de novas tecnologias de processamento, seleção de políticas de criação de gado de corte e seleção de sistema de produção de fazendas em uma perspectiva de proteção do meio ambiente). Como vantagens observadas pelos agentes decisores, foram identificadas: aprendizado sobre tomada de decisão, uma melhor compreensão de suas perspectivas e de outras pessoas, conhecimento de maneiras de expressar suas decisões e o estímulo à discussão e compartilhamento de ideias. Nos três estudos de caso, não foram aplicados um método do AMD em específico, e sim disseminadas as bases fundamentais para a tomada de decisão utilizando esta ferramenta, o

que se mostrou suficiente para a resolução dos problemas propostos. Com a experiência adquirida, foram apontadas as seguintes ações/atitudes essenciais para a aplicação do AMD em futuros projetos:

- assegurar que os agentes de decisão ou suas empresas estejam preparados para investir tempo na decisão. Os envolvidos devem ser informados da extensão de sua participação e ter acesso à informação antes do início do processo de decisão. Tempo adicional deve ser requerido caso a tecnologia de decisão não seja familiar;
- entender o contexto do problema antes do planejamento do processo de decisão;
- conhecer sobre os agentes decisores, na fase de planejamento: atitudes, experiências, habilidades e motivo da participação;
- garantir que o problema, o processo de decisão, as ferramentas utilizadas, e qualquer outra alternativa pré-definida sejam entendidas por todos os agentes decisores, agentes facilitadores ou analistas, no estágio inicial. Não assumir que estes foram compreendidos por definição, sem ação prévia;
- reconhecer a importância de se estabelecer a confiança entre os agentes decisores. Este pode ser feito também através de um agente facilitador em comum;
- saber que uma certa quantidade de tempo e de comprometimento é necessária para a identificação de critérios e de alternativas, especialmente quando estes não estão pré-definidos ou quando se está lidando com tecnologia pouco conhecida;
- ser flexível na implementação e estar preparado para revisar o plano caso seja requisitado ou vantajoso. Alguns fatores podem não ser entendidos ou aparecerem até que o processo esteja acontecendo;
- saber que nem todos os participantes estarão satisfeitos com o processo de decisão ou com os resultados, devidos às diferenças de personalidade, conhecimento / experiências, objetivos e expectativas.

Lahdelma e Salminen (2001) discutem sobre a aplicabilidade do método SMAA e a sua variante SMAA-II, com um estudo de caso considerando os dados da avaliação de construção de um porto na cidade de Helsinque, Finlândia. As conclusões foram que o método é aplicável em casos que existam mais de um agente decisor e situações em que pouco ou nenhum peso seja conhecido (expressamente determinado) e os valores dos critérios possam estar imprecisos. Assim o SMAA-II tem por objetivo determinar e avaliar as alternativas, de

acordo com as respostas dos agentes decisores, elegendo aquelas que tiveram maior número de votos positivos dentro do contexto.

Em Gomes *et al.* (2009b), foram utilizados os métodos THOR e TODIM para a criação de ferramentas de avaliação imobiliária para casa de aluguel na cidade de Volta Redonda, Rio de Janeiro. Este estudo de caso foi proposto pelo fato de que nem todos os fatores que geram o preço de um aluguel estão associados a um valor monetário. Daí, para diferentes imóveis e situações, a metodologia proposta deve ser reavaliada considerando os novos cenários.

Gomes (2005) trata sobre a aplicação do método THOR para a avaliação de soluções de tratamento de água marinha proveniente dos lastros dos navios cargueiros, que trazem consigo novas espécies marinhas para regiões sem defesas naturais. Para tal, o autor levanta os possíveis valores que o agente decisor deve buscar para resolver o problema:

- A) quais são as alternativas viáveis para a decisão do problema;
- B) qual é a função objetivo para avaliar o problema;
- C) quais são os critérios a serem avaliados;
- D) quais são as consequências das alternativas;
- E) como reduzir as incertezas e riscos das alternativas;
- F) como classificar as alternativas;
- G) existem planos de contingência para consequências indesejáveis;
- H) quem são os atores decisores;
- I) quem são as pessoas que podem mudar os resultados da decisão;
- J) quais são as fontes externas confiáveis de informação;
- K) como obter informação precisa dos agentes decisores;
- L) análise da existência de interesses conflitantes.

Cavalcante e Almeida (2005) fizeram um estudo da aplicação do método PROTHEE II para auxílio na tomada de decisões de políticas de manutenção preventiva em uma indústria. Estas políticas têm por objetivos, em indústrias de produção de bens, evitar o maior número possível de falhas nas máquinas, diminuindo, assim, atrasos na produção, retrabalhos, desperdícios de insumos, horas-extras e estoques altos. Assim foi proposta uma metodologia para substituição de peças com base em mais de um critério.

Em Lee *et al.* (2001), é proposta uma nova metodologia integrando as bases do AMD para um sistema de seleção de fornecedores, a saber: o SSMS (*Supplier Selection and Management System*, ou Sistema de Seleção e Gerenciamento de Fornecedores). O SSMS está dividido em três fases. A primeira consiste no Sistema de Seleção de Fornecedores, constituído por um cadastro dos possíveis fornecedores, sistema de pesos para os critérios de seleção e sistema de escolha dos fornecedores. A segunda fase é o Sistema de Gerenciamento dos Fornecedores que monitora os fornecedores através da avaliação dos pesos dos critérios dados aos fornecedores. A terceira fase constitui o Sistema Estratégico de Compras que avalia os custos, a qualidade, o serviço e a entrega dos produtos adquiridos dos fornecedores, estando estes itens de acordo com a visão estratégica da empresa no que se refere à gestão de recursos e práticas de seus concorrentes. Como crítica ao trabalho, os autores sugerem que, simultaneamente a implementação desta metodologia, planos de ação fossem elaborados, caso os critérios adotados não fossem cumpridos.

Gonçalves *et al.* (2010) utilizam o método ELECTRE I e Programação de Compromissos para avaliação de alternativas de liberação das vazões dos açudes na bacia hidrográfica do rio Curu, no estado do Ceará. Para tal, foram considerados aspectos hidrológicos, sociais, políticos e econômicos, pois dentre as principais atividades econômicas da região, está a agricultura por irrigação.

Geldermann e Rentz (2005) utilizam os métodos PROMETHEE e AHP para a avaliação do ciclo de vida (ACV) de um produto do ponto de vista ambiental, e para tal foi feita a comparação presente na Figura 12:

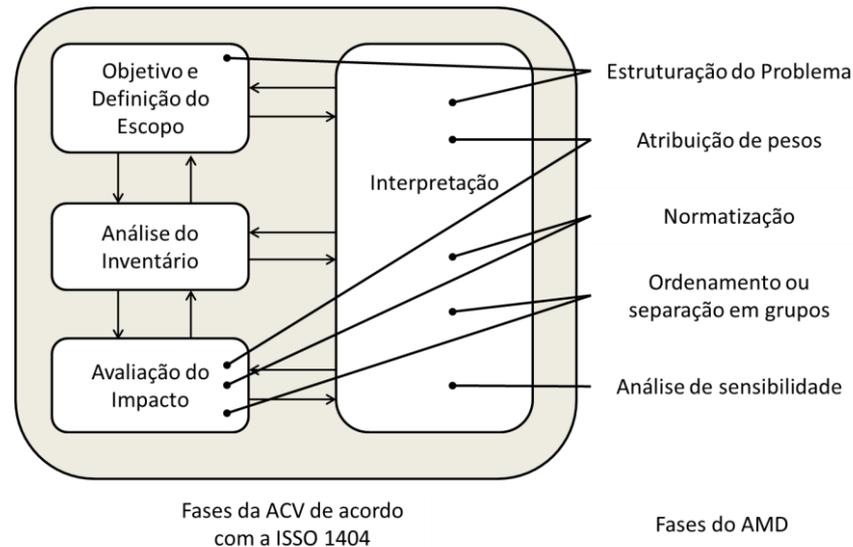


Figura 12: Comparação entre ACV e AMD
 Fonte: Geldermann e Rentz (2005).

A partir da Figura 12, é possível fazer a relação visual de quais fases o AMD pode auxiliar na avaliação da ACV, considerando a diminuição dos impactos ambientais referentes ao fluxo de energia e massa da produção de um produto dentro de uma empresa, levando em consideração aspectos ecológicos, econômicos e técnicos.

5.7.3 Utilização do AMD na mineração

Dentre os trabalhos publicados abordando a aplicação da metodologia AMD na mineração estão Almeida *et al.* (2005), Xinchun e Youdi (2004), Lozano (2006) e Basçetin *et al.* (2006).

Almeida *et al.* (2005) aborda a utilização do AMD para auxílio na seleção do método de lavra para uma mineração de rochas ornamentais (granito ou mármore) situada no estado do Espírito Santo.

Para tal, o autor utiliza as seguintes alternativas de métodos clássicos de lavra: A1: por lixiviação, A2: por bancada, A3: por tombamento, A4: lavra subterrâneo, A5: lavra a céu aberto e A6: em tiras. Os critérios utilizados para a avaliação e comparação de cada método foram:

1. custo do método de mineração;
2. segurança do método para seus trabalhadores;
3. impacto ambiental;
4. potencial humano e capacidades requeridas para a exploração;
5. qualidade do produto final obtido.

Com base nos resultados obtidos, a partir da utilização do método PROMETHEE II de priorização, para o referido estudo de caso, Almeida *et al.* (2005) concluiu que a ordem de preferência é : A1, A4, A2, A6, A5 e A3. O texto não descreve como foi realizado o processo de construção das tabelas de avaliação de critério e nem quais os especialistas envolvidos, mas aponta que para o estudo de caso envolvido, a utilização da metodologia AMD foi muito proveitosa para a seleção de uma metodologia de lavra, pois relacionou em uma mesma função elementos distintos e importantes como aspectos econômicos, políticos, sociais e tecnológicos. Outra conclusão foi que o resultado esperado pelo agente decisor, que mesmo após a simulação da alteração de alguns pesos das variáveis ($\pm 15\%$) continuaram os mesmos, mostrando que o modelo gerado foi robusto. Ainda de acordo com Almeida *et al.* (2005), para a aplicação em outros estudos de caso, variações deveriam ser feitas para atender às especificidades de projeto.

No artigo de Xinchun e Youdi (2004), é proposta a avaliação da ordem de exploração de possíveis reservas de carvão na China, devido ao fato deste recurso ter grande demanda pelo país, da diminuição de suas reservas e dos fatores sociais e econômicos que são envolvidos em tais empreendimentos. A ferramenta de AMD utilizada foi o AHP para a avaliação de sete possíveis áreas de exploração (A, B, C, D, E, F e G). Os fatores considerados para a avaliação de cada área e que faziam parte da função objetivo principal foram: A: condições de recursos geológicos (31%), B: condições tecnológicas (30%), C: estado de poluição ambiental da área (17%) e D: situação econômica da periferia geográfica (22%). Cada um dos quatro fatores foram subdivididos em:

- A. condições da reserva da área minerável (35%);
- A. condições da estrutura geológica (28%);
- A. a qualidade dos recursos minerais (23%);
- A. tipo de recurso mineral (14%).
- B. condição de estocagem dos produtos (28%);
- B. a razão de aparecimento de tiras na exploração de recursos minerais(16%);

- B. condições estruturais do minério (21%);
- B. condições climáticas da área de mineração (17%); e
- B. condições dos equipamentos de produção (frotas) (18%).
- C. a retirada do solo pela exploração da jazida (30%);
- C. a poluição da água pela exploração da jazida (30%);
- C. a poluição do ar pela exploração da reserva (25%);
- C. a poluição sonora pela exploração da reserva (15%).
- D. as condições de transporte da área minerada (28%);
- D. estado de desenvolvimento econômico da área periférica (17%);
- D. demanda do mercado pelo minério (26%);
- D. condições de suprimento de materiais na região (13%);
- D. outras condições para implantação da indústria de mineração na região (16%).

A partir da aplicação do AHP, foi possível chegar à sequência decrescente de desenvolvimento: D, G, B, E, C, A e F. O artigo traz a conclusão que a ordenação de exploração de áreas de um mesmo bem mineral pode ser feita através da AHP, pois resultou em uma ordem possível através de um método racional.

Lozano (2006) utiliza a variante multiplicativa do AHP para a análise das possíveis alternativas de locais e discorre sobre os métodos de construção de uma barragem de rejeitos a ser construída pela empresa MINER S.A. na cidade de Carmen de Atrato, na Colômbia. Os critérios considerados foram: os efeitos da ruptura da barragem, o transporte de rejeitos para o local e o processo de implantação da barragem. Todos estes critérios foram avaliados segundo a ótica dos possíveis impactos na água, ocupação humana, fauna e solo. Como conclusão de seu trabalho, o autor relata que sua maior contribuição para o tema foi a elaboração sistemática das hierarquias de critérios de avaliação das alternativas de locais de barragem de rejeito, visto que após a elaboração do mesmo, a aplicação da variante do método AHP e seus respectivos cálculos com ajuda de planilha eletrônica, não representaram dificuldades para o autor.

Dentre os trabalhos pesquisados, o de Basçetin *et al* (2006) foi o único a relacionar o tema de aplicação do AMD para a seleção de equipamentos. Neste, o autor relata sua experiência com o desenvolvimento e aplicação do *software* EQS (*Equipment Selection*). Dentre os critérios utilizados para seleção de equipamento, o autor destaca: produtividade, granulometria do material produzido, umidade, distância média de transporte, condições do

piso das estradas, condições das praças de carregamento, meio ambiente (poeira, ruído, entre outros), escala a ser utilizada (produtividade, tempo, recursos, entre outros), resistência média ao rolamento, condições climáticas, estabilidade do local de trabalho, vida útil do equipamento, flexibilidade, taxa de disponibilidade física, taxa de utilização, mobilidade, produção contínua ou não contínua, suporte/serviços, capacidade de carga, custo do capital e custo de operação.

Em seu trabalho, Başçetin *et al.* (2006) analisam o método de lavra a ser adotado, considerando as várias possibilidades de combinações de conjuntos de equipamentos. Seu estudo de caso foi realizado em uma mina a céu aberto de carvão, a sudeste da Turquia. No estudo, foi avaliada a possibilidade de serem utilizadas as combinações de carregadeira, caminhão, transportador de correia ou britagem móvel. O resultado ótimo encontrado foi a opção que contempla a combinação dos quatro equipamentos.

4 ESTUDO DE CASO: DEFINIÇÃO DO PROBLEMA ABORDADO

No presente capítulo, estão definidas as bases do estudo de caso que deram origem à dissertação. Para tal, são descritos os fatores relacionados à aquisição e/ou substituição de equipamentos em uma atividade econômica, assim como as características do problema estudado.

4.1 O problema de aquisição / substituição de equipamentos

Toda atividade econômica, seja de transformação ou de serviços, envolve a utilização de ferramentas para a otimização de seus trabalhos. Para que elas sejam as mais adequadas possíveis para a tarefa, estudos de aquisição são necessários para se realizar o seu correto dimensionamento. Nesta mesma linha, estudos de substituição devem ser feitos para se saber o momento em que os equipamentos devem ser substituídos.

Para a presente dissertação, o foco não é a determinação de qual a melhor combinação de equipamentos a serem utilizados, mas, sim, entender os motivos e circunstâncias que tornam a substituição atrativa, e para tal pode-se relacionar os seguintes fatores que conduzem à substituição de equipamentos:

- **Desgaste:** mudanças físicas ocorrem com o equipamento devido ao uso constante, gerando declínio da eficiência, redução da qualidade do produto/serviço prestado e aumento dos custos de operação/manutenção;
- **Obsolescência:** com o passar do tempo, podem aparecer equipamentos tecnicamente mais aperfeiçoados no mercado. Considerando os ganhos decorrentes dos avanços tecnológicos, a soma dos ganhos em desempenho e redução dos custos pode justificar a troca de um equipamento;
- **Exigências do Mercado:** os clientes fazem novas exigências em torno de requisitos, requerendo dos fornecedores uma adaptação para suprir a nova demanda;
- **Financiamento:** oportunidades de aquisição de equipamentos facilitada momentaneamente devido a linhas de crédito, incentivos do governo, entre outros.

Outros fatores que devem ser considerados no momento de aquisição de equipamentos, mas que não são computados diretamente:

- **Erros do passado:** não devem ser considerados, pois não são possíveis de serem previstos e provavelmente não irão acontecer de novo.
- **Custos Irreversíveis:** são custos que não podem ser resgatados, mas que possuem significância para a empresa (por exemplo, a pintura de um equipamento).
- **Perspectiva Externa:** se refere à visão do mercado e mudanças no horizonte de planejamento.
- **Impostos:** se referem às taxas envolvidas com a aquisição e lucro proporcionado pelo equipamento.

Os fatores citados anteriormente servem para formar uma base de referência para a tomada de decisão em possíveis projetos de aquisição/substituição de equipamentos. É importante ressaltar que nem todos esses fatores podem estar disponíveis para o “ciclo de vida” do ativo e que quanto maior a disponibilidade e confiabilidade dos dados apresentados, maior será o nível de confiança associado à tomada de decisão.

4.2 Estudo de caso

A empresa, objeto de estudo, é um operador logístico sediado no Estado de Minas Gerais que é responsável pelo transporte de bauxita de uma mineradora também localizada no mesmo estado. O operador possui frota de 18 caminhões rodoviários adaptados para mineração, que são responsáveis pelo transporte de minério das frentes de lavra para a pilha de alimentação do britador primário, além do transporte de minério beneficiado (quando solicitado) de uma pilha para outra.

O autor desta dissertação realizou trabalho de consultoria de julho a dezembro de 2010 no referido operador logístico e, por motivos de preservação de informações sigilosas e de imagem, algumas informações apresentadas foram modificadas com o consentimento das empresas envolvidas.

O estudo de caso consistiu no desenvolvimento de um projeto de seleção de caminhões rodoviários especiais (adaptados para mineração) para a substituição de 10 caminhões da frota atual do operador logístico. Parte da importância do trabalho se deve ao elevado montante de recursos envolvidos, da ordem de quatro milhões de reais, que é significativo considerando-se o porte da empresa.

4.3 Atividades realizadas

Para a realização do projeto de aquisição/substituição de equipamentos foram realizadas as atividades elencadas na seção 4.3.1 para avaliação da situação atual da empresa, levantamento das possíveis aquisições de equipamentos disponíveis no mercado, além da sugestão de soluções com base nas características da empresa.

4.3.1 Aquisição e análise de dados

A partir da definição do estudo de caso, foram elaboradas e realizadas as seguintes atividades:

- aquisição de dados sobre as reais condições de operação;
- levantamento das variáveis mais relevantes para aquisição dos equipamentos;
- aquisição de dados referentes aos novos equipamentos a serem avaliados;
- análise dos benefícios qualitativos e quantitativos de cada um dos equipamentos analisados;
- utilização da metodologia AMD para relacionar as variáveis de cada um dos cenários de aquisição de equipamentos;
- apresentação de um relatório referente às conclusões, mostrando quais e quantos caminhões têm maior probabilidade de maximização dos lucros do contratante do projeto de acordo com os critérios adotados.

Com a definição de tais objetivos, o projeto foi dividido em três fases, apresentadas nas três próximas seções.

4.3.1.1 Primeira fase: Dados da empresa

A primeira fase se referiu à obtenção de custos de manutenção e operação dos equipamentos em uso. Como base para tal, foram observados os principais geradores de custo por unidade rodoviária como:

- distância média de transporte;
- consumo de combustível e óleo lubrificante por quilômetro;
- peças de reposição;
- mão-de-obra necessária para operação;
- custos adicionais como impostos, seguro, lavagem, entre outros.

Para a realização desta tarefa foi consultado o sistema de ERP (*Enterprise Resource Planning*) da empresa em questão, relativo ao ano de 2010, cujos dados, em valores aproximados, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Dados da empresa foco do estudo de caso

| Centro de Custo: | Ordem de Grandeza: |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| Movimentação de minério | 1,4 milhões de toneladas de ROM |
| Combustível | 682 mil litros = R\$1.317.000,00 |
| Custo com pneu + lubrificante | R\$330.000,00 + R\$28.700,00 |
| Custo com peças | R\$ 900.000,00 |
| Custo com mão-de-obra ¹⁴ | R\$ 812.000,00 |
| Total de horas reais trabalhadas: | 50.000 h |
| Lucro bruto | R\$ 4.500.000,00 |
| Lucro líquido tributável | R\$ 1.300.000,00 |

Os valores da Tabela 5 têm por objetivo mostrar a ordem de grandeza das principais atividades e centros geradores de custo para empresa, assim como a importância dos custos gerados pela utilização dos caminhões.

Além das características dos equipamentos atuais, é importante a aquisição de dados sobre as condições de operação, como o estado de manutenção das estradas, compatibilidade

¹⁴ Por mão-de-obra são considerados os motoristas mais o pessoal de apoio das atividades, exceto pessoal administrativo.

de trabalho entre escavadeira e caminhão e condições climáticas e geológicas da região mineradora. Estes dados foram buscados na segunda fase do projeto.

4.3.1.2 Segunda fase: Análise do cenário

A segunda fase envolveu a análise dos dados da realidade de operação da empresa e a consulta às informações sobre os novos equipamentos pretendidos. Para tal, foram requisitadas aos fabricantes de caminhões rodoviários as fichas técnicas dos modelos capazes de operar em condições de mineração. Além disto, foram feitas entrevistas com pessoal da área técnica e gerencial da empresa foco do trabalho com o objetivo de conhecer melhor a operação.

Os fornecedores de caminhões pesquisados e contatados foram Ford, Volvo, Mercedes-Benz, Volkswagen, Iveco, Scania e Ginaf. Para cada um foi requisitada a apresentação de proposta de seus modelos que apresentassem condições de operar em mineração.

Após a coleta de dados junto aos fornecedores de caminhões, foram realizadas três reuniões com as pessoas responsáveis por tomar decisões na empresa, caracterizando o grupo de especialistas em gerenciamento da frota de caminhões. Este grupo era composto pelo diretor-presidente da empresa, o gerente e o administrador *em loco* das atividades da empresa, já que a sede e a operação estão situadas em localidades distintas.

O resultado destas entrevistas foi o melhor entendimento das operações e do tipo de desafio às quais a frota está sujeita a suportar.

As frentes de lavra de bauxita se situam a uma distância de 10 km do ponto de basculamento dos caminhões, podendo ser o britador primário ou pilha pulmão do britador. As reservas de cada frente de lavra, em geral, são de quantidade reduzida, obrigando a troca contínua das frentes e inviabilizando, assim, o custo da construção de vias de acesso mais elaboradas e permanentes. Tais vias possibilitariam o tráfego de caminhões fora-de-estrada que, em geral, são mais indicados para as condições de mineração mas exigiria maiores cuidados, devido ao maior porte dos equipamentos.

A solução encontrada foi a aquisição de caminhões rodoviários adaptados para a operação em condições rigorosas de uso e não a aquisição de caminhões fora-de-estrada. Esta solução se mostrou ideal devido ao fato de a empresa de logística já possuir experiência com o uso de caminhões rodoviários convencionais e ser de pequeno porte, além de não ter o capital necessário para o custeio das atividades envolvidas na operação de caminhões fora-de-estrada.

Outro ponto positivo da solução é a flexibilidade que essa seleção de equipamentos proporciona. Por não exigir a construção de vias permanentes elaboradas, os caminhões rodoviários adaptados podem facilmente trafegar em vias com pouco preparo, além de poder se locomover de uma frente de lavra para outra com maior rapidez. O porte baixo dos caminhões também ajudou na compatibilidade com os equipamentos de carregamento existentes, tais como retroescavadeiras e pás-carregadeiras.

O fator flexibilidade se mostrou bastante atrativo no que tange à possibilidade de utilização destes caminhões em outras atividades industriais, como a construção civil. Este fato é de extrema importância para a empresa, pois não limita a utilização destes equipamentos em mineração, possibilitando, em situações de crise econômica ou de revenda de equipamentos usados, a venda dos ativos para outros setores da economia.

Devido ao fato de a frota atual possuir em média mais de 10 anos de uso, os custos com manutenção estão cada vez mais altos, comprometendo os lucros da empresa.

Atualmente, o mercado possui equipamentos com sistema de tração de acordo com os descritos na Tabela 6.

Tabela 6: Sistemas de tração / locomoção disponíveis no mercado

| Sistema | Número de eixos | Eixos tracionados |
|----------------|------------------------|--------------------------|
| 4x2 | 4 | 2 |
| 6x2 | 6 | 2 |
| 6x4 | 6 | 4 |
| 8x4 | 8 | 4 |
| 10x4 | 10 | 4 |

Outro fator de aquisição é a escolha do sistema de tração do caminhão. No mercado existem modelos que podem ser escolhidos de acordo com os sistemas de tração descritos na Tabela 6. A lógica da escolha de um sistema de tração diz que quanto maior o número de

eixos livre e tracionados do caminhão, maior será a área de distribuição da carga útil, carga máxima a ser transportada por ciclo de operação e a robustez do sistema como um todo.

Para o transporte de minério eram utilizados equipamentos com tração 6x4 e 8x4, devido ao fato do rendimento operacional corresponder às demandas de produtividade exigidas em contrato, com maior custo/benefício à época.

Os equipamentos com tração 8x4 possuíam maior capacidade de carga e robustez, porém dois fatores determinaram a sua não utilização posterior. O primeiro diz respeito ao fato de o pavimento do piso não possuir preparação adequada, de acordo com as normas regulamentadoras do Brasil (NBR) e do fabricante fornecedor dos equipamentos. O segundo fator diz respeito aos ângulos inadequados de inclinação da via. Devido a estes dois fatores, durante o período de chuva os caminhões 8x4 poderiam derrapar se manobrados com suas capacidades de transporte levadas ao limite. Assim, estes tinham que ser operados com capacidade reduzida. Tal fato fez com que os caminhões 8x4 fossem vendidos, gerando a compra de novos caminhões 6x4.

Outro fator importante para a aquisição de caminhões rodoviários adaptados foi a presença do recurso técnico mecânico chamado “redução no cubo”. Segundo Meritor (2010), o sistema de redução no cubo proporciona maior elevação do equipamento do solo e melhor relação de redução de marchas, proporcionando maior força ao conjunto propulsor do veículo, ideal para trabalhos em terrenos irregulares. Por experiências e relatos de outras empresas ligadas ao transporte de ROM, a utilização de caminhões sem redução no cubo, em atividades de mineração, gera o desgaste prematuro de peças, com um custo muito elevado na retífica de caixas de câmbio e outras peças.

Considerando as questões descritas nos parágrafos anteriores, o veículo a ser selecionado para a substituição dos ativos em operação na empresa deve ser equipado com tração 6x4 e redução no cubo. Com tais premissas, somente três modelos de veículos, de três fabricantes diferentes, satisfaziam a essas condições. Esses veículos, doravante denominados V1, V2 e V3, possuem características técnicas (capacidade de carga, torque, custo de aquisição, manutenção, etc) muito próximas, que não possibilitam a supremacia absoluta e direta de uma alternativa técnica em relação às demais.

Cabe ressaltar que este estudo se fez presente apenas para a aquisição do conjunto propulsor, constituído pelo “cavalo mecânico”. O sistema de caçamba e descarga da caçamba

não foram estudados, pois a empresa já possuía fornecedor e, por este motivo, não pretende mudar o mesmo.

4.3.1.3 Terceira fase: Criação do modelo de avaliação

A terceira fase envolveu o levantamento e avaliação dos fatores que são importantes para a seleção de um caminhão rodoviário adaptado em conjunto com a equipe de especialistas da empresa. No total, foram levantados cinco critérios principais:

Critério 1: Prestígio do fabricante. O operador logístico atua no mercado há mais de uma década, já experimentou a utilização de vários modelos de caminhões, e para determinadas atividades, possui as suas preferências. Porém, com o passar do tempo, o desenvolvimento tecnológico diminuiu a distância entre o diferencial dos fornecedores, criando dúvida no operador com relação à decisão de continuar atuando com a mesma marca e modelo ou de mudar para outra.

Tais mudanças devem ser estudadas com cuidado, pois apenas compensa se os pontos fortes do equipamento diferente do fornecedor atual forem tão melhores que justifiquem o período de transição de substituição de tecnologias. Isso se justifica, pois a empresa já possui equipe técnica de operação, manutenção e suporte altamente treinada e familiarizada com o fornecedor atual.

Critério 2: Revenda. Um requisito muito importante para a empresa é o fator de revenda do equipamento adquirido. Ao contrário dos caminhões fora-de-estrada que, em geral, são utilizados até o final de sua vida útil apenas para mineração, os caminhões rodoviários podem ser vendidos para qualquer outro tipo de atividade.

Devido ao fato da taxa de retorno demandar mais tempo do que um equipamento menos custoso, os caminhões fora-de-estrada exigem que sua utilização seja estendida por não existirem muitas mudanças tecnológicas neste segmento e devido à não existência de mercado de compra de caminhão fora-de-estrada usado, a não ser pelo valor residual do aço contido no mesmo.

Existe a possibilidade de repassar o caminhão rodoviário adaptado como entrada para a aquisição de um novo, porém isto muda de acordo com o fornecedor. É de conhecimento da empresa que alguns fornecedores são melhor conceituados e, assim, alguns modelos são mais fáceis de ser revendidos.

De acordo com estudos realizados com a empresa (ver Anexo I, resumo do trabalho), a partir de três anos de uso, os caminhões começam a necessitar de manutenções de maior porte, como retífica do motor e da caixa de câmbio. Assim, é sugerida a substituição da frota em um período de três anos, garantindo o retorno sobre o investimento e minimizando os custos com operação e manutenção, ajudando a garantir liquidez rápida de revenda com uma frota nova. Esta é uma boa estratégia de planejamento para se contornar períodos de crise prolongados (assim como visto no ano de 2008).

Critério 3: Serviço mecânico da rede autorizada. Este critério remete à análise da qualidade das oficinas mecânicas credenciadas a fazer reparos pelo fornecedor de equipamentos. Primeiramente, deve-se considerar a distância dos serviços autorizados até a frente de operação das máquinas. A distância pode, muitas vezes, inviabilizar a compra de um ativo. Neste estudo de caso, tal fato não ocorreu, verificando-se apenas diferenças de quilometragens dentro de um nível aceitável, porém devendo ser considerados.

Deve-se também analisar a infraestrutura que o serviço autorizado possui. Caso não possua infraestrutura e pessoal suficientes, o tempo de reparo do serviço pode se estender demasiadamente. No histórico da empresa estudada, há relatos a respeito de equipamentos que ficaram parados por mais de três meses por falta de peças.

Critério 4: Garantias. As garantias de compra estão, em geral, atreladas ao tempo de utilização ou quilometragem percorrida, no que se refere a motor e caixa de marchas. Porém, de acordo com o fornecedor, garantias estendidas podem ser adquiridas pelo comprador, avaliando-se a severidade do uso dos equipamentos, ou de acordo com apólices de seguro adquiridas. Outro tipo de garantia importante a ser avaliada é a oferecida pelo serviço autorizado, pois tais serviços, quando requisitados, são de alto valor e devem possuir garantia.

Critério 5: Custo de aquisição. O valor do equipamento em si não diferencia uma alternativa de outra para a empresa estudada, visto que os custos de operação e manutenção superam em pouco tempo de uso o valor de aquisição do equipamento. Mesmo assim, comparações podem ser feitas. Além de se considerar o valor do ativo, outros fatores como

facilidade de linha de crédito, com tempo de pagamento mais prolongado, podem ser avaliados em conjunto.

Após o relacionamento das principais características que determinam o processo de aquisição de um caminhão rodoviário adaptado para mineração, pode-se montar a estrutura hierárquica do problema de seleção presente na Figura 13.



Figura 13: Estrutura hierárquica do problema de seleção de caminhões rodoviários adaptados para mineração

A partir da Figura 13, que compila os diversos fatores envolvidos na seleção de veículos de transporte para mineração, pode-se observar que o problema em questão não é de simples solução. São envolvidos vários critérios e subcritérios, e cada um deles deve ser descrito de acordo com uma escala quantitativa ou qualitativa. Para melhor entendimento dos subcritérios, alguns pontos relevantes foram ressaltados para facilitar suas análises, a exemplo

do subcritério “experiência do equipamento atual” que foi dividido em pontos fortes e pontos fracos.

O processo de avaliação e formulação da função objetivo foi realizado a partir de um consenso entre os membros do grupo de especialistas, resultando na Tabela 7, que contém os respectivos pesos dos critérios e subcritérios para a formulação da função objetivo do problema.

Tabela 7: Função objetivo do problema de seleção de caminhões rodoviários adaptados para mineração

| Critério | Peso | Subcritério | Peso |
|------------------------------|-------------|------------------------------------|-------------|
| Prestígio do fabricante – PF | 35% | Experiência atual | 60% |
| | | Experiência de outras empresas | 30% |
| | | Adaptação ao novo | 10% |
| Revenda – RV | 25% | Percentual médio de desvalorização | 20% |
| | | Facilidade de venda do usado | 80% |
| Serviço autorizado – SA | 15% | Distância até a mina | 50% |
| | | Instalações da autorizada | 50% |
| Garantias – GR | 15% | Garantia do equipamento novo | 50% |
| | | Garantia estendida ou seguro | 25% |
| | | Garantia da autorizada | 25% |
| Custo de aquisição – CA | 10% | Valor de aquisição do ativo | 80% |
| | | Facilidades de financiamento | 20% |

Analisando os valores da Tabela 7 podemos concluir que para os agentes decisores, que formavam o grupo de especialistas, o prestígio do fabricante e a revenda são os critérios que deveriam possuir maior peso em sua função de avaliação, seguido dos outros critérios, assim como mostrado na referida tabela, evidenciando o grau de importância de cada subcritério para o agente decisor.

A avaliação das alternativas foi um processo realizado exclusivamente por um único avaliador (neste caso o dono da empresa), acompanhado pelo autor do presente trabalho. A partir de sua avaliação pôde-se montar a Tabela 8 contendo as avaliações das alternativas segundo os critérios e subcritérios estabelecidos. Esta avaliação foi realizada de acordo com uma escala de 0 a 10, em que a pontuação dada significa o nível em que a alternativa cumpre com os requisitos possíveis para determinado subcritério. Essa avaliação foi realizada em comparação com a melhor prática presente no mercado (*benchmark*). A nota máxima (10) é interpretada como o preenchimento de todos os requisitos desejáveis para determinado critério. Assim, quanto maior a nota, melhor o critério com que a alternativa foi avaliada pelo

agente decisor. Foi acertado que uma nota cinco, ou menor, representa que o critério de determinada alternativa obteve avaliação abaixo do mínimo desejado.

Tabela 8: Avaliação das alternativas V1, V2 e V3

| FO | Critério | Subcritério | Avaliação | | |
|---------------------|-------------------------|------------------------------------|-----------|----|----|
| | | | V1 | V2 | V3 |
| Seleção de caminhão | Prestígio do fabricante | Experiência atual | 8 | 6 | 4 |
| | | Experiência de outras empresas | 7 | 7 | 7 |
| | | Adaptação ao novo | 9 | 8 | 8 |
| | Revenda | Percentual médio de desvalorização | 7 | 5 | 3 |
| | | Facilidade de venda do usado | 9 | 5 | 3 |
| | Serviço autorizado | Distância até a mina | 5 | 5 | 5 |
| | | Instalações da autorizada | 5 | 5 | 5 |
| | Garantias | Garantia do equipamento novo | 7 | 6 | 6 |
| | | Garantia estendida ou seguro | 8 | 7 | 7 |
| | | Garantia da autorizada | 8 | 7 | 7 |
| | Custo de aquisição | Valor de aquisição do ativo | 5 | 7 | 9 |
| | | Facilidades de financiamento | 5 | 7 | 8 |

Analisando a Tabela 8, pôde-se tirar as seguintes conclusões:

- 1) O dono da empresa valoriza a “experiência atual” na utilização do V1 (veículo 1), porque é o mesmo fornecedor de sua frota atual, já tendo trabalhado também com frota composta por V2 (veículo 2) e V3 (veículo 3).
- 2) A “experiência de outras empresas” relatada pelo agente decisor ressalta que a utilização desses três veículos em mineração, se fizeram opções reais e de igual capacidade de produção para serem utilizadas. Por isto, à este subcritério foram atribuídas as mesmas notas para os três veículos.
- 3) A “adaptação ao novo” se fez pouco expressiva para com as três alternativas, pois não mostrou desafios técnicos diferentes dos apresentados para a atualidade da empresa.
- 4) O “percentual médio de desvalorização” teve como base o banco de dados apresentado na tabela de preços da FIPE (2011) e a experiência do agente decisor. Somente analisando a tabela FIPE não houve grande diferença na comparação dos três veículos, porém é de conhecimento do agente decisor a existência de diferenciação no mercado entre os três veículos.

- 5) No quesito “distância até a mina” foi constatado que a diferença em quilômetros, para as três alternativas, não justificavam pontuações diferentes. Também para análise das “instalações das autorizadas” não foi constatada diferença significativa entre as alternativas.
- 6) No critério “garantias”, quando seus subcritérios foram avaliados para as alternativas, constatou-se que não há características que diferenciam significativamente uma alternativa de outra.
- 7) Considerando-se o critério “custo de aquisição”, as três alternativas são muito próximas em valores monetários, porém os valores das alternativas V2 e V3 eram mais atraentes para o agente decisor.

A partir dos valores presentes na Tabela 8, cabe uma última análise global. Considerando a pontuação final de cada alternativa e os pesos relativos de cada critério, existem tendências que mostram a preferência do agente decisor pela aquisição de frota composta por caminhões V1. O estudo de caso serviu de base para a aplicação dos métodos AMD presentes no capítulo 7, e para concluir se esta tendência se confirmará nos resultados.

5 APLICAÇÃO DO AMD NA SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE MINERAÇÃO

O processo de tomada de decisão, em muitos cenários, não utiliza apenas os métodos de avaliação/seleção econômica apresentados na seção 3.5.2. Existem casos em que a diferença monetária entre duas alternativas é de tal maneira insignificante que os ganhos em outras áreas justificam a escolha de uma alternativa menos rentável.

No capítulo 5 da presente dissertação foi realizada a revisão de alguns dos principais métodos de AMD existentes na literatura, com a finalidade de se avaliar quais os métodos possuem melhores chances de serem empregados na seleção de equipamentos de mineração. Após a explicação dos métodos mais usados, alguns destes foram escolhidos para a aplicação no estudo de caso. Com o término da análise dos métodos e aplicação no estudo de caso, foram geradas conclusões sobre a aplicabilidade da AMD na mineração, em especial na seleção de equipamentos de transporte.

5.1 Principais métodos multicritério

Os principais métodos de AMD são comumente definidos pela utilização de modelos claramente formalizados para se facilitar os processos de tomada de decisão que, em geral, são realizados de forma natural pelos seus agentes decisores. Possibilita desta forma o melhor conhecimento do problema, dos objetivos e os sistemas de valores que foram aplicados para a tomada de determinada decisão. Dentre os tipos de problemas que a metodologia AMD se aplica, pode-se destacar (GOMES *et al.*, 2004):

- Problema tipo α ($P\alpha$): selecionar a “melhor” alternativa ou as melhores alternativas;
- Problema tipo β ($P\beta$): aceitar alternativas que parecem “boas” e descartar as que parecem “ruins”, ou seja, realizar uma classificação das alternativas;
- Problema tipo γ ($P\gamma$): gerar uma ordenação das alternativas;
- Problema tipo δ ($P\delta$): realizar uma descrição das alternativas.

Dentre as metodologias AMD pesquisadas na literatura técnica, dois centros de pesquisa foram identificados como sendo os maiores colaboradores no desenvolvimento de

métodos AMD durante sua criação, desenvolvimento e amadurecimento, denominadas as Escolas *Americana* e *Francesa*. Mesmo havendo outros centros de pesquisa e desenvolvimento na AMD, estes dois termos ainda são frequentes nas bibliografias consultadas. Após a exposição das teorias destas duas escolas, outros métodos serão relatados no presente trabalho.

5.1.1 Métodos da Escola Americana

A Escola Americana de estudos relacionados ao desenvolvimento da AMD está fortemente ligada à teoria da Utilidade Multiatributo (em inglês, MAUT) que enuncia que, para todo problema, existe uma função de valor que será aplicada em um conjunto de alternativas as quais se deseja avaliar. Esta teoria assume que o agente decisor ou grupo de agentes tomadores de decisão é capaz de subdividir a função objetivo em critérios pelos quais as alternativas serão avaliadas de maneira hierárquica. A teoria da Utilidade Multiatributo pode ser empregada em muitas situações de avaliação de problemas reais, porém algumas questões fundamentais devem ser conhecidas pelo avaliador antes de se aplicar a referida teoria (GOMES *et al.*, 2004).

No trabalho de Keeney e Raiffa (1976) *apud* Gomes *et al.* (2004) são apresentadas nove etapas para se aplicar a teoria da Utilidade Multiatributo. Mesmo as etapas estando em ordem, o autor infere que as mesmas podem ser realizadas de forma interativa e simultânea. Sempre que necessário uma etapa pode ser repetida e reavaliada para que informações sejam acrescentadas ou alteradas de acordo com a demanda do processo de decisão. As principais etapas estão listadas a seguir.

Etapa 1: Identificar e definir os tomadores de decisão. Para que a decisão seja tomada com maior rigor, deve relacionar o maior número de características que tenham relevância para a solução do problema. Para tal, é necessário que as pessoas afetadas diretamente pelo problema ou que possuam experiência com determinadas áreas-chave estejam envolvidas durante o processo de tomada de decisão.

Etapa 2: Identificar e definir as alternativas. Mesmo que não exista um número teórico limite para as alternativas a serem avaliadas, é comum uma pré-seleção das

alternativas que possuem maiores chances de serem selecionadas, caso exista um conjunto maior de alternativas a serem consideradas. Esta seleção, em geral, é feita avaliando-se quais alternativas possuem pontuação mais elevada de acordo com os critérios-chave selecionados. A delimitação do número de alternativas se faz necessária para evitar que análises feitas com um grande número de alternativas gerem muitas discordâncias, desgaste e esforços desnecessários por parte de seus avaliadores.

Etapa 3: Definir os critérios relevantes para o problema de decisão. O processo de definição dos critérios, em geral, é uma tarefa interativa realizada por um conjunto de agentes decisores ou *experts* no problema a ser avaliado. Uma técnica auxiliar muito utilizada nessa etapa é o *brainstorming*, que consiste em reuniões para o levantamento de ideias e eleição das melhores práticas a serem consideradas. Para problemas complexos, a forma mais utilizada para a correlação dos critérios é a criação de hierarquias estruturadas em forma de “árvore”, com critérios mais importantes e genéricos sendo decompostos em níveis mais básicos e mais propícios para avaliação. Não existe uma forma ou fórmula de hierarquia definida para nenhum problema em especial. Para cada problema, uma nova hierarquia deve ser construída para contemplar as demandas e restrições que deverão ser superadas. Como não existe uma forma genérica a ser seguida para a construção da árvore de critérios, são sugeridos cinco fatores para a avaliação da consistência dos critérios selecionados:

- **Completeness:** Ao término da construção da árvore de critérios, é avaliado se todos os critérios que tenham alguma importância para os agentes decisores estão presentes.
- **Operacionalidade:** Quando todos os critérios dos níveis mais baixos da árvore forem suficientemente claros e abrangentes para serem avaliados perante todas as alternativas selecionadas.
- **Decomponibilidade:** refere-se ao fato de que todas as alternativas devem ter condições de serem avaliadas de acordo com os critérios selecionados.
- **Ausência de redundância:** consiste na verificação se dois ou mais critérios tem o mesmo significado. Se este fato não for evitado, pode ocorrer de uma alternativa ter uma maior pontuação de forma indevida, influenciando o resultado da decisão. Para se evitar a redundância, é comum a avaliação da retirada de um critério. Se o critério retirado não apresentar nenhuma alteração no resultado final, então existem fortes indícios de redundância para aquele critério.

- **Tamanho mínimo:** Caso existam muitos critérios a serem avaliados, sua análise pode ser comprometida por gerar erros decorrentes da fadiga dos agentes decisores por estarem participando de um processo repetitivo e extenso, perdendo-se o foco do processo. Para se evitar tais problemas, os critérios selecionados devem estar divididos em poucos níveis, evitando-se que neste nível as alternativas não possam mais ser diferenciadas. Se este fato ocorrer, é possível que esse nível de detalhamento dos critérios possa ser excluído para se evitar trabalho desnecessário, que não possui nenhuma interferência no resultado final.
- **Independência preferencial:** Outro fator a ser considerado na formação da função preferencial (árvore e decisões) é a independência dos critérios entre si, fazendo com que a pontuação dada a um critério não interfira na pontuação de outro.

Etapa 4: Avaliar as alternativas em relação aos critérios. Esta fase é comumente denominada pontuação, onde são determinadas as diferentes escalas de cada critério, já que não é necessário que os critérios selecionados possuam uma escala linear ou quantitativa igual entre si. Como exemplo, pode-se avaliar um critério no quesito financeiro e outro referente à qualidade do serviço prestado. Ambas as escalas quantitativa e qualitativa não podem ser comparadas de forma direta, o que evidencia a necessidade de se determinar uma escala intermediária a ser aplicada para todos os critérios. Após a determinação das escalas, as alternativas são avaliadas de acordo com critérios e escalas previamente definidos.

Etapa 5: Determinar a importância relativa dos critérios. Esta fase consiste em se atribuir “pesos” aos critérios a fim de mostrar para o avaliador (agente decisor) a importância destes para a função objetivo do problema. Os pesos determinam o quanto um critério contribui para a escolha de uma alternativa. O conjunto dos pesos de todos os critérios forma a função objetivo que determinará a seleção das alternativas.

Etapa 6: Determinar a avaliação global de cada alternativa. Utilizando-se a função objetivo formulada na etapa anterior, as alternativas são pontuadas gerando-se o efeito desejado, seja de ordenação, seleção, agrupamento, exclusão, entre outros.

Etapa 7: Análise de sensibilidade. É importante a realização da análise de sensibilidade após a determinação das avaliações globais, em especial, nos valores dos pesos dos critérios para se determinar até que ponto os valores das alternativas não se alteram e por consequência os seus resultados.

Etapa 8: Recomendações e apresentação de relatório. Todo o processo de tomada de decisão, preferencialmente, deve ser registrado em forma de relatório a fim de se justificar as medidas e o processo de tomada de decisão considerado, para se chegar ao resultado.

Etapa 9: Implementação. Mesmo sendo considerada a última etapa do processo de tomada de decisão, esta por sua vez deve ser considerada desde o início, pois os agentes decisores devem estar cientes de seus efeitos e consequências para a empresa. É possível que esta etapa seja avaliada como um dos critérios na seleção das alternativas.

Genericamente, as nove etapas apresentadas podem ser aplicadas durante o processo de decisão de qualquer método da teoria da Utilidade Multiatributo. Na seção 5.1.1.1 é apresentado um dos métodos mais estudados e utilizados pela *Escola Americana*, a saber: o método de análise hierárquica de processo ou comumente referido como análise hierárquica e suas variantes.

5.1.1.1 Método de análise hierárquica clássico (AHP-Clássico)

Um dos primeiros métodos da teoria da Utilidade Multiatributo a ser desenvolvido e pesquisado até a atualidade, pela escola americana, é a análise hierárquica (em inglês AHP), criado por Thomas L. Saaty em 1980. O AHP possui essa denominação devido à estruturação de seu processo de decisão em níveis hierárquicos que facilitam a compreensão e análise por seus agentes decisores. Na Figura 14 é representada uma estrutura genérica para a seleção de um equipamento, que é típica de problemas que envolvem a AHP. Nesta representação hierárquica, os níveis considerados para avaliação do problema de seleção de equipamentos foram divididos em sub-níveis de acordo com os itens julgados mais importantes para este problema-exemplo.

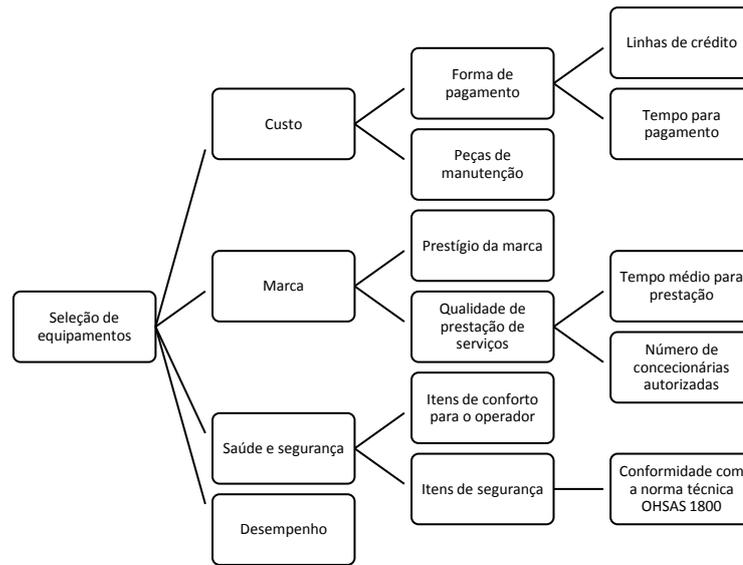


Figura 14: Estrutura hierárquica genérica para seleção de equipamentos

O método AHP-Clássico pode ser estruturado em quatro elementos fundamentais a serem desenvolvidos e definidos durante a sua utilização: hierarquia, matrizes de decisão, análises de inconsistência e de sensibilidade (GOMES *et al.*, 2004).

O primeiro estágio fundamental se refere à elaboração de atributos e propriedades. Neste, estágio é definido um número finito de alternativas e propriedades das relações hierárquicas que farão parte da estrutura de avaliação e resolução do problema.

Com a estrutura de hierarquia montada, o segundo estágio fundamental é a criação das “matrizes de decisão”. Estas matrizes são constituídas a partir da comparação entre pares de critérios de cada alternativa segundo uma escala de avaliação. Esta escala denominada Escala Fundamental de Saaty está apresentada na Tabela 9:

Tabela 9: Escala fundamental de Saaty (1980)

| Pontuação | Relação de importância | Avaliação do par de critério |
|------------------|--|--|
| 1 | Igual importância | As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo. |
| 3 | Importância pequena de uma sobre a outra | A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação a outra. |
| 5 | Importância grande ou essencial | A experiência ou juízo favorece fortemente uma atividade em relação à outra. |
| 7 | Importância muito grande ou demonstrada | Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra. Pode ser demonstrada na prática. |
| 9 | Importância absoluta | A evidência favorece uma alternativa em relação à outra, com o mais alto grau de segurança. |
| 2,4,6 e 8 | Valores intermediários | Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições. |

Fonte: Saaty (1980) *apud* Gomes *et al.* (2004).

A partir da escala fundamental exibida na Tabela 9 e da estrutura da Figura 14, pôde-se montar a Tabela 10 contendo um exemplo de avaliação das três alternativas segundo a ótica do critério custo.

Tabela 10: Comparações paritárias entre alternativas para cada critério

| | | Alternativa de comparação | | |
|-------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------|
| | | A1 | A2 | A3 |
| Alternativa base | A1 | 1 | 3 | 5 |
| | A2 | 1/3 | 1 | 3 |
| | A3 | 1/5 | 1/3 | 1 |

Para a construção da Tabela 10 foram feitas as suposições de que o custo da alternativa A1 possui importância pequena em relação à A2 e importância essencial em relação a A3, e que A2 possui importância pequena em relação à A3. É válido ressaltar que, nas matrizes de decisão, as diagonais principais são sempre iguais a “1” e que os elementos abaixo da diagonal principal são o inverso dos elementos acima da diagonal principal, resultando em um “espelhamento” dos elementos da matriz.

Desta forma, primeiramente são construídas as matrizes de decisão para a avaliação dos critérios. Em seguida, são construídas as matrizes para a avaliação das alternativas segundo cada critério ou subcritério. Para o exemplo presente na hierarquia da Figura 14,

seriam construídas 16 matrizes de decisão, uma para a definição dos pesos dos critérios e 15 para a comparação dos critérios e subcritérios.

A partir das matrizes de decisão, as mesmas devem ser normalizadas para o cálculo dos “vetores de prioridades”, nos níveis dos subcritérios e posteriormente dos critérios. Assim, é possível expressar as relações de ordenação dos critérios e depois agregar estes vetores de prioridades dos critérios em um vetor global para a ordenação das alternativas. Os cálculos necessários para se encontrar o vetor de prioridade global não serão apresentados nesse momento (serão apresentados no estudo de caso), mas tomando como referência a equação (10) pode-se tirar algumas conclusões.

$$V_{(global)} = (0,5 ; 0,3 ; 0,2) \quad (10)$$

A partir da equação (10), gerada como exemplo, podemos concluir que segundo a ótica do problema e a avaliação dos pesos e critérios analisados, chegou-se a resposta de que a alternativa A1 responde a 50% dos critérios, a alternativa A2 responde a 30% dos critérios e a alternativa A3 responde a 20% dos critérios.

No método AHP-Clássico cabe a realização do estágio de avaliação da consistência dos julgamentos realizados. Segundo Saaty (1980) *apud* Gomes *et al* (2004) podem existir inconsistências de julgamento na criação das matrizes de decisão caso ocorram avaliações imprecisas. Estas avaliações acontecem quando a relação entre dois ou mais critérios não estão muito claras.

Tabela 11: Exemplo de matriz de julgamentos genérica

| Julgamento consistente | Julgamento inconsistente |
|-------------------------------|---------------------------------|
| A > B | A > B |
| B > C | B > C |
| A >> C | A > C |

A Tabela 11 aponta que se a primeira alternativa “A” for considerada preferível em relação a “B” e “B”, por sua vez, preferível a “C”, haverá inconsistência caso a avaliação da primeira alternativa em relação à terceira seja fraca ou simplesmente preferível, devendo “A” ser muito mais preferível em relação à terceira alternativa (A>>C).

Mesmo a inconsistência no processo de julgamento sendo indesejável, níveis de inconsistência são aceitáveis e não possuem forte influência no resultado final caso estejam

controlados dentro de um nível aceitável. Vale ressaltar que, a inconsistência de cada matriz de decisão pode ser calculada e comparada com uma escala própria.

Constatou-se que vários autores (Lootsma, 1990; Watson e Freeling, 1982; Belton e Gear, 1983; entre outros) criticam o método AHP-Clássico devido ao fato deste possibilitar a ocorrência do fenômeno chamado “inversão de ordem”. Este fato decorre do efeito da inserção ou remoção de uma nova alternativa depois da avaliação, o que pode gerar uma alteração ou inversão da ordem de preferências gerada pelo método conforme descrito anteriormente.

No trabalho de Schoner e Wedley (1989), os autores defendem que a inversão de ordem é decorrente do fato da inserção de uma nova alternativa sem a reavaliação do novo conjunto de alternativas. Se o novo conjunto de alternativas fosse reavaliado por completo, tal efeito não ocorreria. Para sanar este problema e evitar a necessidade de uma nova avaliação do problema, cada vez que uma alternativa fosse acrescentada ou retirada, os autores propõem a utilização de uma escala absoluta em vez de uma escala relativa.

Para Gomes *et al.* (2004) podemos definir comparação relativa ou absoluta.

- **Comparação absoluta:** as alternativas são comparadas com uma alternativa padrão que preferencialmente deve se manter idêntica com o passar do tempo;
- **Comparação relativa:** as alternativas são comparadas umas com as outras, considerando-se características que possuam em comum.

Saaty (1987) *apud* Gomes *et al.* (2004) afirma que, com a utilização de uma escala absoluta, o efeito da inversão de ordem não acontece, independente do número de alternativas a serem acrescentadas ou removidas e o momento em que o mesmo ocorre. O problema está em encontrar uma alternativa que não se altere com o passar do tempo e que possa servir de modelo.

A partir do problema da inversão de ordem, variações do AHP-Clássico foram propostas por vários autores. Nas seções 5.1.1.2 à 5.1.1.4 serão apresentadas variações do AHP-Clássico a exemplo do multiplicativo, referenciado e B-G e MACBETH.

5.1.1.2 Método AHP multiplicativo

O método AHP multiplicativo foi primeiramente desenvolvido por Lootsma (1990) como variação do AHP-Clássico para se evitar a ocorrência da inversão de ordem com a agregação de outros itens que poderiam contribuir para o processo de decisão. Primeiramente, o método AHP multiplicativo se diferencia pela utilização de uma escala própria de julgamentos, a escala verbal “natural de Lootsma” de comparação relativa dos critérios par a par das alternativas apresentada na Tabela 12:

Tabela 12: Escala natural de Lootsma

| Escala numérica | Escala verbal de comparação das alternativas |
|------------------------|---|
| -8 | A_i é amplamente menos desejável que A_j |
| -6 | A_i é muito menos desejável que A_j |
| -4 | A_i é menos desejável que A_j |
| -2 | A_i é pouco menos desejável que A_j |
| 0 | A_i é indiferente a A_j |
| 2 | A_i é pouco mais desejável que A_j |
| 4 | A_i é mais desejável que A_j |
| 6 | A_i é muito mais desejável que A_j |
| 8 | A_i é amplamente mais desejável que A_j |

Fonte: Adaptado de Lootsma (1990) *apud* Gomes *et al.* (2004).

A partir da Tabela 12, foram criadas as matrizes de decisão, avaliando-se par a par as alternativas segundo um critério ou subcritério.

Dentre as principais diferenças do método multiplicativo para com o método clássico pode-se ressaltar:

- o uso da escala natural de Lootsma em vez da escala fundamental de Saaty;
- os vetores de avaliação das alternativas não são obtidos de forma aritmética, mas de forma geométrica;
- a consideração de que, em muitos casos, mais de uma pessoa é responsável pela tomada de decisão. O método multiplicativo sugere a aplicação de pesos para as avaliações dos decisores, de acordo com sua importância para a solução do problema.

Além do método multiplicativo, outros métodos são sugeridos para análise, a exemplo do método referenciado, B-G e o MACBETH.

5.1.1.3 Método MACBETH

O método MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*, ou em português Medida de Atratividade Através de Técnica de Avaliação de Base Categórica) foi desenvolvido por Carlos A. Bana e Costa e J. C. Vansnick na década de 1990. Este método permite a representação numérica dos julgamentos dos decisores com base na divisão em duas fases: estruturação e avaliação. Bana *et al.* (1995) lembra que as duas fases possuem o mesmo grau de importância, pois “não adianta uma solução sofisticada para o problema errado”.

Segundo Schmidt (1995), na fase de estruturação do MACBETH é que ocorre o entendimento do problema e do ambiente que ele envolve. Esta fase é constituída pela:

- identificação dos critérios de rejeição e da família dos pontos de vista fundamentais (PVF's). Devem ser relevantes e representar os valores dos decisores;
- definição do sistema de indicadores (definição da escala a ser utilizada);
- construção da matriz de juízo de preferências de cada PVF para avaliar a importância relativa de cada nível;
- ordenação dos PVF's segundo a avaliação dos decisores;
- construção da matriz de juízo de valores dos PVF para a determinação da importância relativa de cada PVF.

Para a fase de avaliação é realizado o julgamento entre as PVF, sendo proposta as atividades a seguir:

- identificação do impacto das alternativas em cada PVF;
- cálculo do valor global de cada alternativa segundo o modelo proposto na fase de estruturação;
- hierarquização das alternativas e análise de sensibilidade.

5.1.1.4 Métodos AHP referenciado, AHP B-G e outros

O método AHP referenciado foi criado a partir da melhoria do AHP clássico, propondo a introdução de uma constante de proporcionalidade denominada k com o intuito de “nivelar” os valores dos critérios e, por consequência, das alternativas.

O método AHP B-G foi fundamentado a partir das críticas relacionadas no trabalho de Belton e Gear (1983) referentes ao fato da introdução de uma nova alternativa no método AHP clássico poder gerar uma inversão na ordem das alternativas. Para a minimização deste efeito, é proposta a normalização do vetor de prioridades a partir do maior valor de prioridade (GOMES *et al.*, 2004).

Existem outras variações do método AHP clássico e cada uma das modificações e melhoramentos visam a alteração de pontos específicos que os autores julgam importantes. Segundo Vargas (1990), os pontos mais estudados para modificação são:

- a escala de transformação fundamental;
- os tipos de julgamentos usados (aleatórios, intervalos, entre outros);
- o número de julgamentos usados;
- a composição da hierarquia e dos níveis;
- a medida da inconsistência;
- os grupos de julgamento e consenso;
- o relacionamento do AHP com outras teorias multicritério, entre outros.

Em tais circunstâncias, o presente estudo não tem por objetivo relacionar e descrever todas as metodologias existentes sobre AMD. A finalidade recai na elucidação das bases que geraram estes métodos e sugestões de aplicação para seleção de equipamentos de mineração.

5.1.2 Aplicação do AHP no estudo de caso

Na presente seção, é apresentado um exemplo de aplicação de uma metodologia AMD, no caso, a variante do método AHP-Clássico denominado WPM - *Weighted Product Model* ou Modelo do Produto dos Pesos.

O AHP-WPM foi escolhido como método a ser aplicado porque, segundo Triantaphyllou (2001), após a aplicação do método AHP-Clássico, é possível a geração de resultados errados devido à sucessivas aplicações de funções de normalização e/ou aditivas nas matrizes de julgamento. Para se evitar este efeito, Triantaphyllou (2001) propõe a criação de uma variação multiplicativa do AHP-Clássico, o AHP-WPM, para a solução deste problema. Para tal, o referido autor aplica as etapas do AHP-Clássico e, ao final, compara os pesos das alternativas geradas. Como resultado da aplicação do referido método, foi obtido um resultado satisfatório para o problema estudado.

5.1.2.1 Aplicação do AHP-Clássico na seleção de equipamentos de mineração

Para a resolução do problema de seleção de equipamentos para a lavra de minas a céu aberto será utilizado o método AHP-WPM. Para tal, são comuns as etapas apresentadas a seguir.

Neste método, há a conversão das avaliações subjetivas de relativa importância para um conjunto global de pesos e pontuações, proporcionando uma compreensão mais fácil quando comparado a outros métodos AMD.

Segundo Costa (2002), o método AHP-Clássico é baseado em comparações do tipo: “Quão importante é o critério C_i em relação ao critério C_j ?”, considerando as alternativas i e j . Perguntas deste tipo são usadas para estabelecer os pesos para os critérios em relação aos pares de alternativas, estabelecendo, assim, algumas matrizes conhecidas como matrizes de correlação, julgamento ou desempenho. No presente estudo, será utilizada a expressão matriz de julgamento.

No estudo de caso, foram criadas 12 matrizes de julgamento de acordo com os subcritérios selecionados e apresentados na seguinte ordem:

1. experiência do equipamento atual – EEA;
2. experiência de outras empresas – EOE;
3. adaptação ao novo – ADN;
4. percentual médio de desvalorização – PMD;
5. facilidade de venda do usado – FVU;
6. distância até a mina – DAM;

7. instalações da autorizada – IDA;
8. garantia do equipamento novo – GEN;
9. garantia estendida ou seguro – GES;
10. garantia da autorizada – GDA;
11. valor de aquisição do ativo – VAT;
12. facilidades de financiamento – FDF.

Para se estabelecer as matrizes de correlação entre os subcritérios de avaliação foi utilizada a escala apresentada na Tabela 9. Utilizando-se da “escala fundamental” foram construídas as matrizes de julgamento das alternativas à luz do subcritério EEA na Tabela 13.

Tabela 13: Matriz de julgamento das alternativas à luz do subcritério EEA

| EEA | V1 | V2 | V3 |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| V1 | 1 | 5 | 7 |
| V2 | 1/5 | 1 | 3 |
| V3 | 1/7 | 1/3 | 1 |

Analisando a Tabela 13, pode-se concluir que o caminhão V1 tem uma preferência grande em relação ao V2 e uma preferência muito grande em relação ao V3 no que se refere ao subcritério EEA. O caminhão V2 tem uma preferência pequena em relação ao V3. As outras relações de comparação são elaboradas a partir da inversão dos valores anteriores refletidos em relação à diagonal principal da matriz de julgamentos. Pode-se fazer analogias similares em relação aos outros 11 subcritérios de acordo com a Tabela 15.

O próximo passo foi a normalização das matrizes. O processo de normalização de uma matriz consiste em fazer o somatório dos elementos de cada coluna e, a seguir, dividir cada elemento pelo respectivo somatório da coluna. Para a matriz de julgamento do subcritério EEA, presente na Tabela 13, tem-se o resultado de sua normalização na Tabela 14.

Tabela 14: Matriz normalizada para o subcritério EEA

| EEA | V1 | V2 | V3 |
|-----|--|--|------------------------------|
| V1 | $\frac{1}{1 + \frac{1}{5} + \frac{1}{7}} = 0,74$ | $\frac{5}{5 + 1 + \frac{1}{3}} = 0,79$ | $\frac{7}{7 + 3 + 1} = 0,64$ |
| V2 | $\frac{1/5}{1 + \frac{1}{5} + \frac{1}{7}} = 0,15$ | $\frac{1}{5 + 1 + \frac{1}{3}} = 0,16$ | $\frac{3}{7 + 3 + 1} = 0,27$ |
| V3 | $\frac{1/7}{1 + \frac{1}{5} + \frac{1}{7}} = 0,11$ | $\frac{1/3}{5 + 1 + \frac{1}{3}} = 0,05$ | $\frac{1}{7 + 3 + 1} = 0,09$ |

É válido observar que na Tabela 14 as três colunas da matriz não possuem valores iguais. Este fato acontece, segundo Costa (2002), porque seus julgamentos foram realizados com certo nível de inconsistência. A consistência de um julgamento é um fator muito importante para a avaliação da utilização do método AHP, e por isso será avaliada com maior detalhamento na seção 5.1.2.2 Análise de Consistência

O próximo passo foi o cálculo das prioridades médias locais (PML), que são obtidas a partir da média das linhas da matriz normalizada. Para a matriz normalizada do subcritério EEA teríamos as PML de acordo com a equação (11).

$$PML_{EEA} = \left(\frac{0,74 + 0,79 + 0,64}{3} ; \frac{0,15 + 0,16 + 0,27}{3} ; \frac{0,11 + 0,05 + 0,09}{3} \right) \quad (11)$$

$$= (0,72 ; 0,19 ; 0,08)$$

O último passo foi a geração do vetor auxiliar de prioridade intermediária (PI) para os subcritérios. O cálculo da PI dos subcritérios consiste na multiplicação de cada elemento do vetor PML pelo peso deste subcritério na formação da pontuação do critério, presente na Tabela 7. A PI do subcritério EEA foi calculada conforme equação (12):

$$PI_{EEA} = (PML_{EEA}(V1) \times Peso_{EEA} ; PML_{EEA}(V2) \times Peso_{EEA} ; PML_{EEA}(V3) \times$$

$$Peso_{EEA}) \quad (12)$$

$$PI_{EEA} = (0,72 \times 0,6 ; 0,19 \times 0,6 ; 0,08 \times 0,6) = (0,43 ; 0,12 ; 0,05)$$

De maneira análoga, pôde-se calcular as matrizes de julgamento, as PMLs e PIs e obter os resultados apresentados na Tabela 15 contendo o resumo dos cálculos. Todos os cálculos encontram-se desenvolvidos no ANEXO II MEMORIAL DE CÁLCULO DO AHP-WPM.

Tabela 15: PML dos subcritérios

| | | V1 | V2 | V3 | PML | PI |
|-----|----|-----|-----|-----|------|------|
| EEA | V1 | 1 | 5 | 7 | 0,72 | 0,43 |
| | V2 | 1/5 | 1 | 3 | 0,19 | 0,12 |
| | V3 | 1/7 | 1/3 | 1 | 0,08 | 0,05 |
| EOE | V1 | 1 | 1 | 1 | 0,33 | 0,1 |
| | V2 | 1 | 1 | 1 | 0,33 | 0,1 |
| | V3 | 1 | 1 | 1 | 0,33 | 0,1 |
| ADN | V1 | 1 | 3 | 3 | 0,6 | 0,06 |
| | V2 | 1/3 | 1 | 1 | 0,2 | 0,02 |
| | V3 | 1/3 | 1 | 1 | 0,2 | 0,02 |
| PMD | V1 | 1 | 5 | 7 | 0,72 | 0,14 |
| | V2 | 1/5 | 1 | 3 | 0,19 | 0,04 |
| | V3 | 1/7 | 1/3 | 1 | 0,08 | 0,02 |
| FVU | V1 | 1 | 5 | 9 | 0,75 | 0,6 |
| | V2 | 1/5 | 1 | 3 | 0,18 | 0,14 |
| | V3 | 1/9 | 1/3 | 1 | 0,07 | 0,06 |
| DAM | V1 | 1 | 1 | 1 | 0,33 | 0,17 |
| | V2 | 1 | 1 | 1 | 0,33 | 0,17 |
| | V3 | 1 | 1 | 1 | 0,33 | 0,17 |
| IDA | V1 | 1 | 1 | 1 | 0,33 | 0,17 |
| | V2 | 1 | 1 | 1 | 0,33 | 0,17 |
| | V3 | 1 | 1 | 1 | 0,33 | 0,17 |
| GEN | V1 | 1 | 3 | 3 | 0,6 | 0,3 |
| | V2 | 1/3 | 1 | 1 | 0,2 | 0,1 |
| | V3 | 1/3 | 1 | 1 | 0,2 | 0,1 |
| GES | V1 | 1 | 3 | 3 | 0,6 | 0,15 |
| | V2 | 1/3 | 1 | 1 | 0,2 | 0,05 |
| | V3 | 1/3 | 1 | 1 | 0,2 | 0,05 |
| GDA | V1 | 1 | 1 | 1 | 0,33 | 0,08 |
| | V2 | 1 | 1 | 1 | 0,33 | 0,08 |
| | V3 | 1 | 1 | 1 | 0,33 | 0,08 |
| VAT | V1 | 1 | 1/5 | 1/7 | 0,08 | 0,06 |
| | V2 | 5 | 1 | 1/3 | 0,28 | 0,22 |
| | V3 | 7 | 3 | 1 | 0,64 | 0,51 |
| FDF | V1 | 1 | 1/5 | 1/7 | 0,08 | 0,02 |
| | V2 | 5 | 1 | 1/3 | 0,28 | 0,06 |
| | V3 | 7 | 3 | 1 | 0,64 | 0,13 |

Como análise para o cálculo das PML, fica evidente quais são as alternativas prioritárias para cada critério, porém este não é o objetivo principal do método e sim, o cálculo da prioridade global para a resolução final do problema. Para se chegar à prioridade global é necessário encontrar o valor das prioridades médias globais de cada critério.

Para o critério prestígio do fabricante (PF), foi realizado cálculo presente na equação (13).

$$\begin{aligned}
 PMG_{PF} = & (PI_{EEA}(V1) + PI_{EOE}(V1) + PI_{ADN}(V1) ; PI_{EEA}(V2) + PI_{EOE}(V2) \\
 & + PI_{ADN}(V2) ; PI_{EEA}(V3) + PI_{EOE}(V3) + PI_{ADN}(V3)) \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$PMG_{PF} = (0,43 + 0,1 + 0,06 ; 0,11 + 0,1 + 0,02 ; 0,05 + 0,1 + 0,02)$$

$$PMG_{PF} = (0,59 ; 0,23 ; 0,17)$$

Para os outros quatro critérios podemos fazer de maneira análoga a equação (13) e chegar ao resultado presente no conjunto de equações (14).

$$\begin{aligned} PMG_{RV} &= (0,74 ; 0,18 ; 0,08) & PMG_{SA} &= (0,34 ; 0,34 ; 0,34) \\ PMG_{GR} &= (0,53 ; 0,23 ; 0,23) & PMG_{CA} &= (0,08 ; 0,28 ; 0,64) \end{aligned} \quad (14)$$

As prioridades globais (PG) dos critérios são obtidas a partir da multiplicação do valor das prioridades médias globais pelo peso de cada critério. Assim para os caminhões V1, V2 e V3, as PGs de cada caminhão são obtidas conforme o conjunto de equações (15) e a equação (16), a seguir:

$$PG_{V1} = (0,59 \times 0,35 + 0,74 \times 0,25 + 0,34 \times 0,15 + 0,53 \times 0,15 + 0,08 \times 0,10) = 0,53$$

$$PG_{V2} = (0,23 \times 0,35 + 0,18 \times 0,25 + 0,34 \times 0,15 + 0,23 \times 0,15 + 0,28 \times 0,10) = 0,24 \quad (15)$$

$$PG_{V3} = (0,17 \times 0,35 + 0,08 \times 0,25 + 0,34 \times 0,15 + 0,23 \times 0,15 + 0,64 \times 0,10) = 0,23$$

Resumindo, a prioridade global pode ser representada pelo vetor da PG da expressão (16):

$$PG = (0,53 ; 0,24 ; 0,23) \quad (16)$$

Com o resultado encontrado na expressão (16) pode-se concluir que, para o exemplo estudado, o caminhão V1 tem uma preferência de 53% em relação aos demais, o caminhão V2 tem uma preferência de 24% e o caminhão V3 uma preferência de 23% na ótica dos critérios, subcritérios e seus pesos relativos propostos para a função objetivo de avaliação.

Uma fase importante a ser realizada, em geral, após a elaboração da matriz de julgamentos e, preferencialmente, antes da aplicação dos cálculos de transformação das matrizes para se encontrar a PG, é a análise de consistência dos julgamentos. Na seção 5.1.2.2 é apresentada a maneira de se realizar essa análise para o estudo de caso.

5.1.2.2 Análise de consistência

Segundo Costa (2002), mesmo quando os julgamentos das relações entre os critérios são realizados por um profissional experiente, podem surgir inconsistências quando existe um grande número de julgamentos a serem realizados.

Para que seja avaliado o grau de consistência de uma solução será aplicado o método utilizado por Saaty (2000) *apud* Costa (2002).

Suponha que existam três alternativas A, B, e C à luz de um critério bem definido na elaboração do problema. Se o avaliador achar sob a ótica de um critério que a alternativa A é melhor que a alternativa B e que por sua vez é melhor que C, então o julgamento será considerado consistente se o valor atribuído à relação respeite a equação $A \rightarrow B \times B \rightarrow C = A \rightarrow C$, ou seja, supondo que $A \rightarrow B = 3$ (segundo a escala de Saaty), que $B \rightarrow C = 3$ e que $A \rightarrow C = 9$ o julgamento está coerente. Por sua vez o julgamento seria inconsistente caso $A \rightarrow B \times B \rightarrow C \neq A \rightarrow C$, o que ocorreria no caso em que o agente decisor realizasse a seguinte classificação: $A \rightarrow B = 3$, $B \rightarrow C = 3$ e $A \rightarrow C = 5$.

Uma forma de se avaliar o grau de consistência de uma matriz de julgamentos é avaliar quanto o maior autovalor desta matriz se afasta da ordem desta matriz. Saaty (2000) *apud* Costa (2002) propuseram a equação (17) para o cálculo do índice de consistência (IC):

$$IC = \frac{|\lambda_{max} - N|}{(N - 1)} \quad (17)$$

em que:

N e λ_{max} representam, respectivamente, a ordem e o maior autovalor da matriz de julgamentos não-normalizados.

Para o cálculo de λ_{max} de cada critério do problema exemplo, seguem-se três passos:

Passo 1) Considerando como exemplo o cálculo de λ_{max} para o subcritério prestígio, os elementos de cada linha da Tabela 13 de julgamentos não-normalizados da EEA são multiplicados pelo seu respectivo valor de prioridades médias locais encontrada na equação (11).

Tabela 16: Matriz auxiliar para cálculo

| EEA | V1 | V2 | V3 |
|-----|----------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| V1 | $1 \times 0,72 = 0,72$ | $5 \times 0,19 = 0,95$ | $7 \times 0,08 = 0,56$ |
| V2 | $\frac{1}{5} \times 0,72 = 0,14$ | $1 \times 0,19 = 0,19$ | $3 \times 0,08 = 0,24$ |
| V3 | $\frac{1}{7} \times 0,72 = 0,10$ | $\frac{1}{3} \times 0,19 = 0,06$ | $1 \times 0,08 = 0,08$ |

A partir da nova matriz é calculado um novo vetor de prioridades a partir da soma dos elementos de suas linhas, obtendo-se o vetor auxiliar igual a: $P' = (2,23 ; 0,57 ; 0,25)$.

Passo 2) Os elementos do vetor auxiliar são divididos pelos elementos do vetor de prioridades médias locais, obtendo-se o segundo vetor auxiliar presente na equação (18):

$$P'' = \left(\frac{2,23}{0,72} ; \frac{0,57}{0,19} ; \frac{0,25}{0,08} \right) = (3,10 ; 3,02 ; 3,08) \quad (18)$$

Passo 3) λ_{max} é obtido pela soma dos elementos do segundo vetor auxiliar (P'') dividido pela ordem da matriz (N), obtendo a equação (19):

$$\lambda_{max}(EEA) = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i'')}{N} = \left(\frac{3,10 + 3,02 + 3,08}{3} \right) = 3,07 \quad (19)$$

Utilizando a equação (17) do índice de consistência, temos a equação (20) para o IC do subcritério critério EEA:

$$IC_{EEA} = \frac{|\lambda_{maxEEA} - N|}{(N - 1)} = \frac{|3,07 - 3|}{(3 - 1)} = 0,03 \quad (20)$$

Pela análise da equação (20) verifica-se que a ocorrência da inconsistência é reduzida com o aumento da ordem da matriz, ou seja, quanto maior o número de alternativas, menor é a chance de se cometer erros de escolha.

Saaty (2000) *apud* Costa (2002) recomenda o uso da razão de consistência (RC) que consiste no resultado da divisão do índice de consistência obtido na equação (20) por outro índice de consistência gerado a partir de uma matriz randômica de mesma ordem. Para Saaty (2000) *apud* Costa (2002) em seus estudos foram gerados os parâmetros presentes na Tabela 17:

Tabela 17: Índices randômicos de consistência (IR)

| Ordem da matriz | Valores do IR |
|-----------------|---------------|
| 2 | 0,00 |
| 3 | 0,58 |
| 4 | 0,90 |
| ... | ... |

Fonte: Costa (2002), (adaptação).

Para este mesmo autor, a razão de consistência pode ser calculada segundo a equação (21):

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (21)$$

Calculando a RC do subcritério EEA temos a equação (22):

$$RC_{EEA} = \frac{0,03}{0,58} = 0,06 \quad (22)$$

Segundo o autor considerado, o valor 0,1 representa o limite superior para RC, isto é $RC \leq 0,1$. Uma RC menor ou igual a 0,1 classifica o subcritério (ou critério, caso seja este o foco da análise) como sendo julgado de forma consistente. Caso contrário, entende-se que o subcritério foi julgado de forma inconsistente. Por melhor que o problema seja estruturado ou julgado, níveis de inconsistência surgirão em decorrência do tamanho do problema a ser analisado, o que indica a aceitação de um limite superior para este erro.

Para o problema em questão o valor da $RC_{EEA} = 0,06$ é menor que 0,1, portanto o subcritério EEA foi julgado de maneira consistente. De maneira análoga, tem-se para os valores de RC dos outros subcritérios listados na Tabela 18:

Tabela 18: Valores para cálculo da RC

| Subcritério | λ_{max} | IC | IR | RC = IC/IR |
|-------------|-----------------|------|------|------------|
| EEA | 3,07 | 0,03 | 0,58 | 0,06 |
| EOE | 3,00 | 0,00 | 0,58 | 0,00 |
| ADN | 3,00 | 0,00 | 0,58 | 0,00 |
| PMD | 3,07 | 0,03 | 0,58 | 0,06 |
| FVU | 3,03 | 0,01 | 0,58 | 0,03 |
| DAM | 3,00 | 0,00 | 0,58 | 0,00 |
| IDA | 3,00 | 0,00 | 0,58 | 0,00 |
| GEN | 3,00 | 0,00 | 0,58 | 0,00 |
| GES | 3,00 | 0,00 | 0,58 | 0,00 |
| GDA | 3,00 | 0,00 | 0,58 | 0,00 |
| VAT | 3,07 | 0,04 | 0,58 | 0,06 |
| DFD | 3,07 | 0,04 | 0,58 | 0,06 |

Os valores da Tabela 18 foram gerados com o auxílio da planilha eletrônica fornecida pelo *software* Microsoft Excel 2010. Em seus cálculos foram consideradas as duas primeiras casas decimais, daí é aceito um erro de $\pm 0,01$ para os valores de RC. Mesmo com esse erro associado ao cálculo de RC, foi constatado que todos os julgamentos foram feitos de forma consistente.

Mesmo não havendo valores acima de 0,1, uma boa prática é o uso da média ponderada dos valores de RC com base nos pesos atribuídos para cada subcritério e critério da função foco principal do problema. Assim, tem-se a equação (23) da média global das razões de consistência para o problema:

$$RC_{\text{média global}} = 0,06 \times 0,6 \times 0,35 + 0,06 \times 0,2 \times 0,25 + 0,03 \times 0,8 \times 0,25 + 0,06 \times 0,8 \times 0,1 + 0,06 \times 0,2 \times 0,1 = 0,03 \quad (23)$$

A partir na análise da equação (23) tem-se que a média global do $RC = 0,03$ foi menor que 0,1, portanto o resultado encontrado na equação (16) para a prioridade global, não foi influenciado significativamente por julgamentos inconsistentes.

Nos casos em que é constatado que níveis de inconsistência podem comprometer o resultado do problema, é sugerido em Costa (2002) a reavaliação das matrizes de julgamento de maneira a diminuir os níveis de inconsistência encontrados nos julgamentos com $RC > 0,1$.

5.1.2.3 Aplicação do AHP-WPM na seleção de equipamentos de mineração

No trabalho de Triantaphyllou (2001) é proposta a variante multiplicativa do AHP-Clássico de tal maneira a criar o AHP-WPM. O AHP-WPM consiste, basicamente, na análise da relação expressa na equação (24):

$$R \left(\frac{A1}{A2} \right) = \prod_{i=1}^n \left(\frac{a_{1i}}{a_{2i}} \right)^{W_i} \quad (24)$$

em que:

A1 e A2 = alternativas a serem comparadas;

a_{1i} e a_{2i} = valores atribuídos a cada alternativa segundo um mesmo critério i ;

W_i = peso do critério i ao qual estão sendo avaliadas alternativas.

Analisando a equação (24), segundo o referido autor, se o produto desta relação for maior do que 1, a alternativa A1 é de maior peso do que A2, daí a alternativa $A1 > A2$, ou caso contrário com resultado menor do que 1, teríamos $A1 < A2$.

Para o problema do estudo de caso, é apresentada a Tabela 19 contendo um resumo dos resultados encontrados para as prioridades médias locais.

Tabela 19: PML dos critérios e alternativas do estudo de caso

| Alternativas | Critérios | | | | |
|--------------|-----------|------|------|------|------|
| | PF | RV | AS | GR | CA |
| | 0,35 | 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,10 |
| V1 | 0,59 | 0,74 | 0,34 | 0,53 | 0,08 |
| V2 | 0,23 | 0,18 | 0,34 | 0,23 | 0,28 |
| V3 | 0,17 | 0,08 | 0,34 | 0,23 | 0,64 |

Os valores da Tabela 19 foram utilizados para a aplicação da relação proposta no AHP-WPM. A partir de tais valores foi possível montar as relações presentes no conjunto de equações (25).

$$R\left(\frac{V1}{V2}\right) = \left(\frac{0,59}{0,23}\right)^{0,35} \times \left(\frac{0,74}{0,18}\right)^{0,25} \times \left(\frac{0,34}{0,34}\right)^{0,15} \times \left(\frac{0,53}{0,23}\right)^{0,15} \times \left(\frac{0,08}{0,28}\right)^{0,10} = 1,98$$

$$R\left(\frac{V1}{V3}\right) = \left(\frac{0,59}{0,17}\right)^{0,35} \times \left(\frac{0,74}{0,08}\right)^{0,25} \times \left(\frac{0,34}{0,34}\right)^{0,15} \times \left(\frac{0,53}{0,23}\right)^{0,15} \times \left(\frac{0,08}{0,64}\right)^{0,10} = 2,48 \quad (25)$$

$$R\left(\frac{V2}{V3}\right) = \left(\frac{0,23}{0,17}\right)^{0,35} \times \left(\frac{0,18}{0,08}\right)^{0,25} \times \left(\frac{0,34}{0,34}\right)^{0,15} \times \left(\frac{0,23}{0,23}\right)^{0,15} \times \left(\frac{0,28}{0,64}\right)^{0,10} = 1,25$$

Analisando o conjunto de equações (25) pode-se inferir que $V1 > V2$, $V1 > V3$ e $V2 > V3$. Portanto podemos concluir a partir da análise multiplicativa proposta pelo AHP-WPM que $V1 > V2 > V3$, assim como o resultado encontrado na aplicação do AHP-Clássico.

5.1.3 Métodos da Escola Francesa

Assim como foi denominada Escola Americana, a um conjunto de métodos MCDA criados inicialmente por pesquisadores norte-americanos, o conjunto de métodos criados por pesquisadores europeus foi denominado Escola Francesa devido a forte influência de pesquisadores franceses.

À Escola Francesa são atribuídos os estudos dos métodos da família Electre (*Elimination Et Choix Tradusant la Réalité*) e da família Prométhée (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*), tendo suas origens respectivamente com artigos publicados por Roy (1968) e Brans (1984).

Nos itens 5.1.3.1 e 5.1.3.2 são tratados os princípios básicos dos métodos que são abordados pela família Electre e Prométhée. Nas seções 5.1.4 e 5.1.5 são aplicados os princípios básicos dos métodos Electre e Prométhée no estudo de caso.

5.1.3.1 Família Electre

Segundo Gomes (2004), uma das principais vantagens introduzidas pelos métodos da família Electre é a utilização de um modelo de preferências diferente da Escola Americana. Tal modelo tem o intuito de ser uma representação mais realista do processo de tomada de decisão.

Quando um agente de decisão necessita avaliar duas alternativas segundo um critério, a Teoria da Decisão Clássica (Escola Americana) prevê que existem apenas duas possibilidades para julgamento: ou há uma preferência estrita (representada pela letra P) ou indiferença (I) entre as alternativas. Estes são os axiomas de “comparabilidade completa” e “transitividade” entre as alternativas que são as bases para a Escola Americana. Para Gomes (2004) pode ocorrer que no processo de decisão:

1. O agente de decisão não seja capaz de optar por uma das alternativas ou pela indiferença entre elas por falta de informação. Nestes casos, a decisão tomada

de forma arbitrária faz com que sejam agregados riscos involuntários e desnecessários ao processo de tomada de decisão.

2. O agente de decisão não possua condições de determinar as reais preferências dos tomadores de decisão por serem entidades remotas ou de difícil acesso (ex: chefes de estado) ou difusas (ex: opinião pública).
3. O agente de decisão pode não querer discriminar uma alternativa por não achar o momento adequado para tal, por falta de informação ou por esperar o momento certo com informação mais precisa.

Considerando as três razões apresentada, o sistema de avaliação que considera apenas a preferência estrita ou indiferença (P e I) deve possuir mais duas situações: incomparabilidade e preferência fraca, formando o Sistema Fundamental de Relações de Preferências (SFRP) apresentado na Tabela 20.

Tabela 20: Sistema fundamental de relações de preferências

| Situação | Definição | Relação binária |
|---------------------|--|---------------------------------|
| Indiferença | Existem razões claras e positivas que justificam a equivalência entre duas alternativas. | I: Simétrica (reflexiva) |
| Preferência estrita | Existem razões claras e positivas que justificam uma preferência significativa a favor de uma (bem definida) das duas alternativas. | P: Assimétrica (irreflexiva) |
| Preferência fraca | Existem razões claras e positivas que não implicam uma preferência estrita a favor de uma (bem definida) das duas alternativas. No entanto, essas razões são insuficientes para que seja assumida uma preferência estrita a favor da outra ou uma indiferença entre as alternativas. | Q: Assimétrica (irreflexiva) |
| Incomparabilidade | Não existem razões claras e positivas que justifiquem uma das três situações acima. | R: Simétrica (irreflexiva) |

Fonte: Gomes (2004).

Segundo o referido autor, tem-se a seguinte análise da Tabela 20 para alternativas genéricas denominadas a e b:

A relação aRb , ou incomparabilidade entre a e b, significa que o agente de decisão não obteve informações suficientes para definir os valores das alternativas a e b, fato este que não pode ser interpretado pela indiferença (aIb). Por outro lado, a noção de preferência fraca (aQb) significa que o agente de decisão está convicto

que a alternativa b não é preferível à alternativa a, ou seja, não bPa, mas o agente reluta entre aPb e alb (GOMES *et al.*, 2004, p. 95).

As quatro situações de preferências presentes na Tabela 20 permitem a elaboração de cinco situações de combinação de preferências presente na Tabela 21.

Tabela 21: Situações de combinações de preferências

| Situação | Definição | Relação binária |
|-----------------------------|---|---|
| Não-preferência | Ausência de razões claras e positivas para justificar uma preferência estrita ou fraca a favor de qualquer uma das duas alternativas. Essa situação combina indiferença e incomparabilidade de discriminação entre elas. | \sim : $a \sim b$ se, e somente se, aIb ou aRb . |
| Preferência (sentido amplo) | Existem razões claras e positivas que justificam uma preferência estrita ou fraca a favor de uma (bem definida) das duas alternativas. Essa situação combina a preferência estrita e a preferência fraca sem discriminação entre elas. | $>$: $a > b$ se, e somente se, aPb ou aQb . |
| Presunção de preferência | Existem razões claras e positivas que justificam uma preferência estrita ou fraca a favor de uma (bem definida) das duas alternativas ou uma indiferença entre elas, sem que haja uma separação significativa entre as situações de preferência fraca e de indiferença. | J: aJb se, e somente se, aQb ou aIb ; $aQb \rightarrow aJb$; $aIb \rightarrow aJb$ ou bJa ; (ou não exclusivo). |
| K-preferência | Nesse caso, ou existem razões claras e positivas que justificam a preferência estrita a favor de uma (bem definida) das duas alternativas, ou verifica-se a incomparabilidade de ambas, sem que nenhuma separação significativa seja estabelecida entre elas. | K: aKb se, e somente se, aPb ou aRb ; $aPb \rightarrow aKb$; $aRb \rightarrow aKb$ ou bKa ; (ou não exclusivo). |
| Superação | Existem razões claras e positivas que justificam seja uma preferência, seja uma presunção de preferência a favor de uma (bem identificada) das duas alternativas, mas sem que haja nenhuma separação significativa entre elas. | S: aSb se, e somente se, $a > b$ ou aJb ; então, aSb se, somente se, aPb ou aQb ou aIb ; $aIb \rightarrow aSb$ ou bSa (ou não exclusivo). |

Fonte: Gomes *et al.*, (2004).

Os métodos Electre são denominados métodos de superação por considerarem apenas as relações em que acontecem ou não a superação das alternativas e seus critérios, demonstrado na situação de combinação das preferências, no que se refere à situação superação descrita na Tabela 21.

O conceito de superação (referido na Tabela 21) pode ser desdobrado em mais dois conceitos: discordância e concordância. Esses dois conceitos se referem a consideração do

risco de se aceitar ao não a superação de uma alternativa sobre outra. Gomes *et al.*, (2004) discorre sobre concordância e discordância conforme a seguir:

- Concordância: ocorre quando um subconjunto significativo dos critérios considera a alternativa a (fracamente) preferível à b.
- Discordância: ocorre quando não há critérios em que a intensidade da preferência da alternativa b em relação à a ultrapasse um limite inaceitável.

É a partir da utilização dos conceitos de discordância e concordância que os métodos Electre definem a sua base de cálculos para criar uma seleção, ordenação ou classificação das alternativas analisadas. Os principais métodos Electre desenvolvidos e estudados se encontram na Tabela 22.

Tabela 22: Versões dos métodos da família Electre

| Versão | Autor | Ano | Tipo de problema | Tipo de critério | Utiliza pesos |
|---------------|-----------------|------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| I | Roy | 1968 | Seleção | Simple | Sim |
| II | Roy e Bertier | 1973 | Ordenação | Simple | Sim |
| III | Roy | 1978 | Ordenação | Pseudo | Sim |
| IV | Roy e Hugonnard | 1982 | Ordenação | Pseudo | Não |
| IS | Roy e Skalka | 1985 | Seleção | Pseudo | Sim |
| TRI | Yu e Wei | 1992 | Classificação | Pseudo | Sim |

Fonte: Gomes *et al.*, (2004).

Analisando a Tabela 22, pode-se perceber que existem várias maneiras de se aplicar os princípios do método Electre a fim de se obter diferentes tipos de resultados assim como desejado para cada tipo de problema. Porém todos os métodos utilizam o conceito básico de superação.

Na seção 5.1.4 é apresentado um exemplo de aplicação do método Electre I para o estudo de caso.

Na seção 5.1.3.2 é apresentado outra família de métodos pertencente à Escola Francesa, os métodos da família Prométhée, também muito estudados.

5.1.3.2 Família Prométhée

Segundo Gomes *et al.* (2004), o nome Prométhée vem do inglês *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*, que em tradução livre pode ser considerado como método de organização do ranqueamento das preferências para

enriquecimento de avaliações¹⁵, sendo este uma categoria de métodos relacionada à Escola Francesa de estudos do AMD.

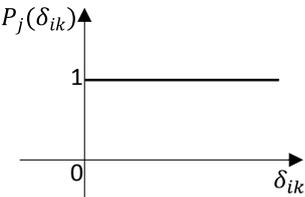
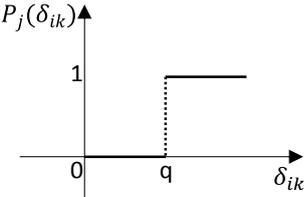
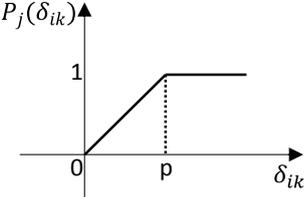
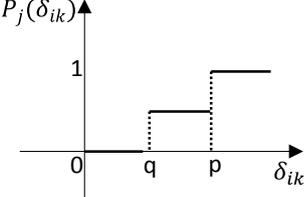
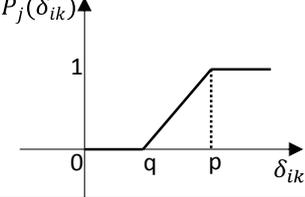
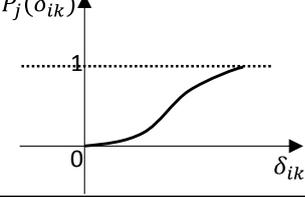
Mais comumente, são referenciados aos estudos da família de métodos Prométée às suas quatro primeiras variantes (I, II, III e IV), possuindo outras variações (V e VI por exemplo). Estes métodos tem por objetivo a ordenação das alternativas de acordo com a ordem de prioridade, a partir de comparações binárias das alternativas, para cada critério. Alguns destes métodos possibilitam a utilização de limites de indiferença e de preferência estrita para a comparação de pseudocritérios, permitindo uma pontuação melhor ou pior de acordo com o tamanho da variação das preferências. Em síntese, pode-se apresentar os seis principais métodos Prométhée como se segue:

- **Prométée I:** realiza uma pré-ordem parcial, pois possibilita a utilização do conceito de incomparabilidade entre as alternativas.
- **Prométée II:** realiza uma pré-ordem total, pois, ao contrário do Prométée I, não possibilita a utilização do conceito de incomparabilidade entre as alternativas.
- **Prométée III:** realiza uma pré-ordem total, com ordenação por intervalos, pois este método trabalha com limites variáveis.
- **Prométée IV:** é uma generalização do Prométhée II, pois possibilita a utilização de um número infinito de alternativas, também realizando uma pré-ordem total.
- **Prométée V:** é um aprimoramento do Prométhée II, pois possibilita a seleção de um subconjunto de alternativas, considerando restrições do problema existente, também realizando uma pré-ordem total.
- **Prométée VI:** Este método possibilita ao agente decisor a avaliação da influência dos pesos dos critérios através de um procedimento gráfico denominado GAIA (*Geometrical Analysis for Interactive Aid*), possibilitando a análise da influência da alteração dos pesos no resultado final. Este método propõe uma pré-ordem total das alternativas.

O método Prométée possibilita a utilização de funções de preferência de acordo com o comportamento do critério a ser analisado, segundo os tipos representados na Tabela 23.

¹⁵ Tradução do autor.

Tabela 23: Tipos de critério e funções de preferência

| Tipo de critério | Representação gráfica | Função de preferência | Descrição |
|--|---|---|---|
| Verdadeiro critério |  | $P_j(\delta_{ik}) = \begin{cases} 0 & \text{se } \delta_{ik} = 0 \\ 1 & \text{se } \delta_{ik} \neq 0 \end{cases}$ | Neste caso não é necessário definir parâmetros. A decisão é relativa à indiferença ou preferência estrita. |
| Quase-critério |  | $P_j(\delta_{ik}) = \begin{cases} 0 & \text{se } \delta_{ik} \leq q \\ 1 & \text{se } \delta_{ik} > q \end{cases}$ | É necessária a definição do limite “q” de indiferença. |
| Preferência linear |  | $P_j(\delta_{ik}) = \begin{cases} \frac{\delta_{ik}}{p} & \text{se } \delta_{ik} \leq p \\ 1 & \text{se } \delta_{ik} > p \end{cases}$ | É necessária a definição do limite “p” de preferência. |
| Critério de nível |  | $P_j(\delta_{ik}) = \begin{cases} 0 & \text{se } \delta_{ik} \leq q \\ \frac{1}{2} & \text{se } q < \delta_{ik} \leq p \\ 1 & \text{se } \delta_{ik} > p \end{cases}$ | É necessária a definição de “p” e “q”. A região compreendida entre os dois limites apresenta uma preferência fraca. |
| Preferência linear e área de indiferença |  | $P_j(\delta_{ik}) = \begin{cases} 0 & \text{se } \delta_{ik} \leq q \\ \frac{(\delta_{ik} - q)}{p - q} & \text{se } q < \delta_{ik} \leq p \\ 1 & \text{se } \delta_{ik} > p \end{cases}$ | É necessária a definição de “p” e “q”. A região compreendida entre os dois limites apresenta uma preferência fraca. |
| Gaussiano |  | $P_j(\delta_{ik}) = 1 - e^{\left(\frac{-\delta_{ik}^2}{2\sigma^2}\right)}$ | Necessita da determinação de σ . |

Analisando a Tabela 23, é possível perceber que o Prométhée aceita a utilização de seis tipos de critérios. Cada tipo de critério possibilita a utilização de variações dos intervalos de preferência ou indiferença, de acordo com o comportamento do critério, representando melhor os diferentes tipos de critérios que o julgamento humano pode considerar durante um processo de decisão. Para tal, diferentes funções de preferência devem ser utilizadas, de acordo com o comportamento do critério.

Na seção 5.1.5 são apresentados quatro passos para a aplicação do Prométée II no estudo de caso.

5.1.4 Aplicação do Electre no estudo de caso

O método Electre I foi escolhido, pois apresentou, para o autor, uma maneira simples e direta de expressar as bases de aplicação que norteiam essa família de métodos.

Para a aplicação do método Electre I foi consultado o texto de Gomes *et al.* (2004) para a elaboração de cinco passos necessários para o desenvolvimento do método.

1° Passo: Elaboração da matriz de julgamentos normalizada. Utilizando-se a Tabela 19 criada na seção 5.1.2.3 para a aplicação do AHP-WPM no estudo de caso, tem-se a base de cálculo para a aplicação do Electre I que determina a utilização da matriz normalizada dos julgamentos e pesos das alternativas segundo os critérios escolhidos. A Tabela 24 foi extraída da Tabela 19 para facilitar a visualização.

Tabela 24: PML dos critérios e alternativas do estudo de caso utilizado no Electre I

| Alternativas | Critérios | | | | |
|--------------|-----------|------|------|------|------|
| | PF | RV | SA | GR | CA |
| | 0,35 | 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,10 |
| V1 | 0,59 | 0,74 | 0,34 | 0,53 | 0,08 |
| V2 | 0,23 | 0,18 | 0,34 | 0,23 | 0,28 |
| V3 | 0,17 | 0,08 | 0,34 | 0,23 | 0,64 |

2° Passo. Cálculo dos índices de concordância. Para o cálculo dos índices de concordância é utilizada a equação (26).

$$c_{a,b} = \sum_{j \in C(x_a, x_b)} w_j \quad (26)$$

em que:

w_j é o peso do critério j ;

$j \in C(x_a, x_b)$ é o conjunto de critérios em que a alternativa a supera ou iguala a alternativa b

a, b são as alternativas avaliadas.

O índice de concordância presente na equação (26) pode ser descrito como sendo o somatório dos pesos dos critérios em que a alternativa “a” supera ou iguala em relação à alternativa “b”, observando que o critério a ser avaliado pode ser de minimização ou maximização na função objetivo.

Como a matriz de julgamento para o estudo de caso foi elaborada para que todos os critérios fossem maximizados, o índice de concordância é a soma do peso do critério caso a alternativa de comparação possua desempenho maior ou igual do que a alternativa comparada. Assim podemos calcular o conjunto de equações (27).

$$\begin{aligned}
 c_{V1,V2} &= 0,35 + 0,25 + 0,15 + 0,15 = 0,9 \\
 c_{V1,V3} &= 0,35 + 0,25 + 0,15 + 0,15 = 0,9 \\
 c_{V2,V1} &= 0,15 + 0,10 = 0,25 \\
 c_{V2,V3} &= 0,35 + 0,25 + 0,15 + 0,15 = 0,9 \\
 c_{V3,V1} &= 0,15 + 0,10 = 0,25 \\
 c_{V3,V2} &= 0,15 + 0,15 + 0,10 = 0,40
 \end{aligned} \tag{27}$$

Para a melhor visualização dos dados obtidos no conjunto de equações (27), é possível a construção da matriz “C” com os índices de concordância:

$$C = \begin{bmatrix} & 0,90 & 0,90 \\ 0,25 & & 0,90 \\ 0,25 & 0,40 & \end{bmatrix}$$

3º Passo: Cálculo dos índices de discordância. Após o cálculo dos índices de concordância, deve-se calcular os índices de discordância de acordo com a equação (28).

$$d_{a,b} = \left(\frac{1}{z}\right) \max_{j \in D(x_a, x_b)} (u_j(x_i) - u_j(x_k)) \tag{28}$$

em que:

z : é o maior valor encontrado para a diferença entre o maior e o menor valor de cada critério.

$u_j(x_i) - u_j(x_k)$: é a subtração entre os valores dos critérios em que a alternativa “a” é superada pela alternativa “b”.

Para o estudo de caso temos o cálculo do valor de “z” na equação (29).

$$z = \text{máx.} [(0,59 - 0,17); (0,74 - 0,08); (0,34 - 0,34); (0,53 - 0,23); (0,64 - 0,08)] = \text{máx.} [0,42; 0,66; 0; 0,30; 0,56] = 0,66 \quad (29)$$

Para os veículos V1, V2 e V3, pode-se calcular seus respectivos índices de discordância através do conjunto de equações (30).

$$\begin{aligned} d_{V1,V2} &= \left(\frac{1}{0,66}\right) \text{máx.} (0,28 - 0,08) = \left(\frac{1}{0,66}\right) \text{máx.} (0,20) = 0,30 \\ d_{V1,V3} &= \left(\frac{1}{0,66}\right) \text{máx.} (0,64 - 0,08) = \left(\frac{1}{0,66}\right) \text{máx.} (0,56) = 0,85 \\ d_{V2,V1} &= \left(\frac{1}{0,66}\right) \text{máx.} ((0,59 - 0,23); (0,74 - 0,18); (0,53 - 0,23)) \\ &= \left(\frac{1}{0,66}\right) \text{máx.} (0,36; 0,56; 0,30) = 0,85 \\ d_{V2,V3} &= \left(\frac{1}{0,66}\right) \text{máx.} (0,64 - 0,28) = \left(\frac{1}{0,66}\right) \text{máx.} (0,36) = 0,55 \quad (30) \\ d_{V3,V1} &= \left(\frac{1}{0,66}\right) \text{máx.} ((0,59 - 0,17); (0,74 - 0,08); (0,53 - 0,23)) \\ &= \left(\frac{1}{0,66}\right) \text{máx.} (0,42; 0,66; 0,30) = 1 \\ d_{V3,V2} &= \left(\frac{1}{0,66}\right) \text{máx.} ((0,23 - 0,17); (0,18 - 0,08)) \\ &= \left(\frac{1}{0,66}\right) \text{máx.} (0,06; 0,10) = 0,15 \end{aligned}$$

A partir dos dados do conjunto de equações (30) é possível a representação de seus resultados em forma de matriz para facilitar a sua visualização, de acordo com a matriz D.

$$D = \begin{bmatrix} & 0,30 & 0,85 \\ 0,85 & & 0,55 \\ 1 & 0,15 & \end{bmatrix}$$

4º Passo: Limiares de concordância e discordância. Após o cálculo dos índices de concordância e discordância, é necessário estabelecer quais serão os limites de concordância e discordância para que uma alternativa seja considerada superior em relação à outra.

Para o referido problema foi considerado que o limite de concordância (LC) e o limite de discordância (LD) são ambos de 50%. Estes limites foram inicialmente atribuídos de forma arbitrária, pois estudos de análise de sensibilidade devem ser realizados para se saber o efeito da adoção desses limites. A análise de sensibilidade do LC e LD foi realizada na seção 5.3.1.

Segundo a metodologia Electre I, para que uma alternativa x_i seja considerada superior em relação à outra x_k ($x_i S x_k$), seu respectivo índice de concordância deve ser maior ou igual ao LC e seu índice de discordância deve ser menor que o LD, caso contrário essa afirmação não pode ser feita. Graficamente, existem duas formas de se representar a relação $x_i S x_k$. A primeira é a representação em forma de matriz, recebendo o valor “um” caso $x_i S x_k$ seja verdadeiro, ou “zero” caso contrário.

Tabela 25: Construção das relações de superação

| Índice de concordância | Índice de discordância | $x_i S x_k$ |
|--------------------------|--------------------------|-------------|
| $c_{V1,V2} = 0,90 > 0,5$ | $d_{V1,V2} = 0,30 < 0,5$ | 1 |
| $c_{V1,V3} = 0,90 > 0,5$ | $d_{V1,V3} = 0,85 > 0,5$ | 0 |
| $c_{V2,V1} = 0,25 < 0,5$ | $d_{V2,V1} = 0,85 > 0,5$ | 0 |
| $c_{V2,V3} = 0,90 > 0,5$ | $d_{V2,V3} = 0,55 > 0,5$ | 0 |
| $c_{V3,V1} = 0,25 < 0,5$ | $d_{V3,V1} = 1,00 > 0,5$ | 0 |
| $c_{V3,V2} = 0,40 < 0,5$ | $d_{V3,V2} = 0,15 < 0,5$ | 0 |

A partir dos dados da Tabela 25, é possível construir a matriz “S” para melhor visualização dos dados.

$$S = \begin{bmatrix} & 1 & 0 \\ 0 & & 0 \\ 0 & 0 & \end{bmatrix}$$

A segunda forma gráfica de se representar essa relação é a utilização de grafos para expressar as relações de ordenação e preferência de uma alternativa em relação à outra. Utilizando os dados presentes na matriz “S” é possível fazer o grafo da solução representado na Figura 15.

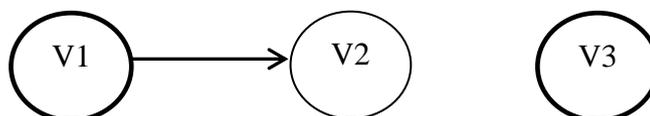


Figura 15: Grafo da relação de superação do estudo de caso

Analisando-se a matriz “S” e a Figura 15 é possível inferir que V1 é superior em relação a V2 e que existem dois núcleos, ou alternativas, a serem escolhidos, nesse caso as alternativas V1 e V3 possuem o mesmo poder de escolha e preferência, segundo o Electre I.

Pela natureza de elaboração da metodologia assim como referenciado na Tabela 22, o método Electre I não tem por objetivo a ordenação das melhores alternativas, mas sim selecionar os melhores candidatos. Outros métodos, como Electre II, III e IV possuem indícios de serem melhores candidatos a aplicação para seleção de equipamentos de mineração, porém a presente aplicação não tem a intenção de determinar o melhor método Electre, mas sim determinar as bases que são comuns aos métodos Electre.

5.1.5 Aplicação do Prometheé no estudo de caso

O método Prométhée II foi escolhido para ser aplicado no estudo de caso porque nele são utilizados os passos necessários para aplicação do Prométhée I, acrescentados de um último passo que possibilita passar de uma pré-ordem parcial para uma pré-ordem final, fato este interessante para a aplicação no estudo de caso.

Tabela 26: PML dos critérios e alternativas do estudo de caso utilizado no Prométhée II

| Alternativas | Critérios | | | | |
|--------------|-----------|------|------|------|------|
| | PF | RV | SA | GR | CA |
| | 0,35 | 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,10 |
| V1 | 0,59 | 0,74 | 0,34 | 0,53 | 0,08 |
| V2 | 0,23 | 0,18 | 0,34 | 0,23 | 0,28 |
| V3 | 0,17 | 0,08 | 0,34 | 0,23 | 0,64 |

Assim como a Tabela 24, a Tabela 26 foi inserida para melhor relacionar os dados do estudo de caso com a aplicação do método Prométhée II. Os passos para a aplicação são os seguintes:

1° Passo: Comparação de duas alternativas com cada critério. Para se determinar as relações de preferências foi utilizada a equação (31).

$$\delta_{ik} = |u_j(x_i) - u_j(x_k)| \quad (31)$$

A equação (31) determina a diferença de desempenho da alternativa x_i em relação a alternativa x_k relativo ao critério j , para os pares de comparação em que a relação $x_i S x_k$ é verdadeira.

Para se calcular a função de preferência de cada critério tem-se a equação (32).

$$P_j(x_i, x_k)\delta_{ik} = P_j(|u_j(x_i) - u_j(x_k)|) = P_j(\delta_{ik}) \quad (32)$$

Analisando a equação (32), pode-se concluir que a função de preferência é dada pela função $P_j(\delta_{ik})$. Essa função é definida de acordo com o comportamento do critério, relacionado na Tabela 23. Para o estudo de caso, foi verificado que os critérios da Tabela 26 seguem uma lógica relacionada ao tipo “verdadeiro critério” por se tratar de uma tabela de dados contendo o resultado de uma avaliação anterior que não considerava os conceitos de indiferença ou preferência estrita. A função de preferência para esse tipo de critério é expressa na equação (33).

$$P_j(\delta_{ik}) = \begin{cases} 0 & \text{se } \delta_{ik} = 0 \\ 1 & \text{se } \delta_{ik} \neq 0 \end{cases} \quad (33)$$

Para o estudo de caso, percebe-se que todos os critérios devem ser maximizados, portanto $P_j(\delta_{ik})$ deve ser calculado quando a relação $x_i > x_k$ é verdadeira, com o valor do julgamento de $x_i > x_k$ gerando o valor “um” ou “zero” caso $x_i = x_k$, de acordo com a equação (33).

Tabela 27: Resultado das funções de preferência

| Par de alternativas | Critérios | | | | |
|---------------------|-----------|----|----|----|----|
| | PF | RV | AS | GR | CA |
| V1-V2 | 1 | 1 | 0 | 1 | - |
| V1-V3 | 1 | 1 | 0 | 1 | - |
| V2-V1 | - | - | 0 | - | 1 |
| V2-V3 | 1 | 1 | 0 | 0 | - |
| V3-V1 | - | - | 0 | - | 1 |
| V3-V2 | - | - | 0 | 0 | 1 |

2º Passo: Cálculo dos índices de preferência. O cálculo dos índices de preferência das alternativas em relação aos critérios utiliza a equação (34).

$$S_{ik} = \frac{\sum_j [w_j \times P_j(\delta_{ik})]}{\sum_j w_j} \quad (34)$$

Para o estudo de caso temos o conjunto de equações (35) contendo os índices de preferência.

$$\begin{aligned}
S_{V1,V2} &= \frac{0,35 \times 1 + 0,25 \times 1 + 0,15 \times 1}{1} = 0,75 \\
S_{V1,V3} &= \frac{0,35 \times 1 + 0,25 \times 1 + 0,15 \times 1}{1} = 0,75 \\
S_{V2,V1} &= \frac{0,10 \times 1}{1} = 0,10 \\
S_{V2,V3} &= \frac{0,35 \times 1 + 0,25 \times 1}{1} = 0,60 \\
S_{V3,V1} &= \frac{0,10 \times 1}{1} = 0,10 \\
S_{V3,V2} &= \frac{0,10 \times 1}{1} = 0,10
\end{aligned} \tag{35}$$

3° Passo: Cálculo dos fluxos de superação. Os fluxos de superação positivos e negativos são calculados respectivamente a partir da soma das linhas e colunas da matriz de fluxos da Tabela 27.

Tabela 28: Fluxos de superação positivo e negativo

| S_{ik} | V1 | V2 | V3 | ϕ^+ |
|----------|------|------|------|----------|
| V1 | | 0,75 | 0,75 | 1,50 |
| V2 | 0,10 | | 0,60 | 0,70 |
| V3 | 0,10 | 0,10 | | 0,20 |
| ϕ^- | 0,20 | 0,85 | 1,35 | |

A partir da análise dos fluxos positivos e negativos presentes na Tabela 27 é possível chegar a conclusão que as alternativas se ordenam em uma pré-ordem parcial igual a $V1 > V2 > V3$. Esse tipo de solução é característica dos métodos Prométhée I.

4° Passo: Cálculo da Pré-ordem Total. Para se conseguir um pré-ordem total, o Prométhée II presume a utilização do fluxo de superação neto, calculado pela equação (36).

$$\phi_i = (\phi_i^+ - \phi_i^-) \tag{36}$$

Para o estudo de caso temos a aplicação da equação (36) no conjunto de equações (37).

$$\begin{aligned}
 \phi_{V_1} &= 1,50 - 0,20 = 1,30 \\
 \phi_{V_2} &= 0,70 - 0,85 = -0,15 \\
 \phi_{V_3} &= 0,20 - 1,35 = -1,15
 \end{aligned}
 \tag{37}$$

Analisando os fluxos de superação neto presentes no conjunto de equações (37), é possível concluir que, para o estudo de caso, as alternativas possuem uma pré-ordem total de acordo com o grafo da Figura 16.

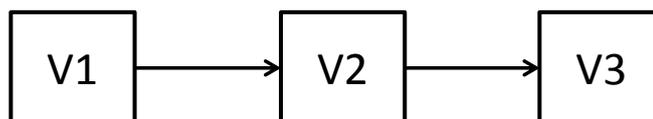


Figura 16: Pré-ordem total para o estudo de caso

O resultado apresentado na Figura 16 para a aplicação do Prométhé II está de acordo com os valores encontrados a partir da aplicação do AHP-WPM e do Prométhé I.

5.2 *Análise de sensibilidade*

Nas seções 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3, são apresentadas as análises de sensibilidade realizadas para os métodos AHP-WPM, Electre I e Prométhé II respectivamente. Cabe ressaltar que a análise de sensibilidade do método AHP-WPM foi realizada de forma mais completa do que a análise dos demais métodos porque este foi o primeiro método a ser implementado, portanto, grande parte das suas análises, para os critérios e subcritérios, podem ser considerados idênticos para os três métodos.

5.2.1 *Análise de sensibilidade do AHP-WPM*

Para a aplicação do AHP-WPM no estudo de caso, foi analisada a influência da alteração dos pesos dos subcritérios, dos critérios e dos valores dos julgamentos. A Tabela 29 foi criada a partir do resultado da alteração dos pesos dos subcritérios, de acordo com o

critério às quais os subcritérios analisados pertencem, alterando um conjunto de subcritérios por vez, mantendo os outros critérios constantes.

Tabela 29: Resultados gerados para os diferentes pesos dos subcritérios do AHP-WPM

| | Subcritério/Pesos (%) | PG (V1; V2; V3) % | | Subcritério/Pesos (%) | PG (V1; V2; V3) % | | | | | | | | | | | | |
|-----------|--|---|-----------|--|--|-----------|---|--|-----------|---|--|-----------|---|--|--|--|--|
| PF | (EEA, EOE, ADN) (70; 15; 15) (50; 25; 25) (25; 50; 25) (15; 70; 15) (25; 25; 50) (15; 15; 70) (33; 33; 33) | 1° (55; 23; 22) 2° (53; 24; 23) 3° (50; 25; 25) 4° (47; 26; 26) 5° (52; 24; 24) 6° (53; 24; 24) 7° (51; 24; 24) | GR | (GEN, GES, GDA) (70; 15; 15) (50; 25; 25) (25; 50; 25) (15; 70; 15) (25; 25; 50) (15; 15; 70) (33; 33; 33) | 14° (54; 24; 23) 15° (53; 24; 23) 16° (53; 24; 23) 17° (54; 24; 23) 18° (52; 25; 23) 19° (51; 25; 24) 20° (53; 24; 23) | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | RV | (PMD; FVU) (70; 30) (50; 50) (30; 70) | 8° (53; 24; 23) 9° (53; 24; 23) 10° (53; 24; 23) | CA | (VAT; FDF) (70; 30) (50; 50) (30; 70) | 21° (53; 24; 23) 22° (53; 24; 23) 23° (53; 24; 23) | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | SA | (DAM; IDA) (70; 30) (50; 50) (30; 70) | 11° (53; 24; 23) 12° (53; 24; 23) 13° (53; 24; 23) | Original: (EEA= 60; EOE=30; ADN=10; PMD=20; FVU=80; DAM=50; IDA=50; GEN=50; GES=25; GDA=25; VAT=80; FDF=20) e PG= (53; 24; 23) | | |

O peso de cada subcritério foi determinado para se estabelecer que exista uma diferença entre o subcritério analisado e os outros de 25%, 40% ou 55% acima dos demais subcritérios do mesmo critério, ou de se avaliar o resultado quando todos os subcritérios possuem um mesmo peso (33% ou 50%). A proposta de utilização desses pesos visa verificar a influência do peso de um subcritério no resultado, quando os outros subcritérios possuem um mesmo valor. A partir da Tabela 29 é possível montar o gráfico da Figura 17 com a compilação dos dados.

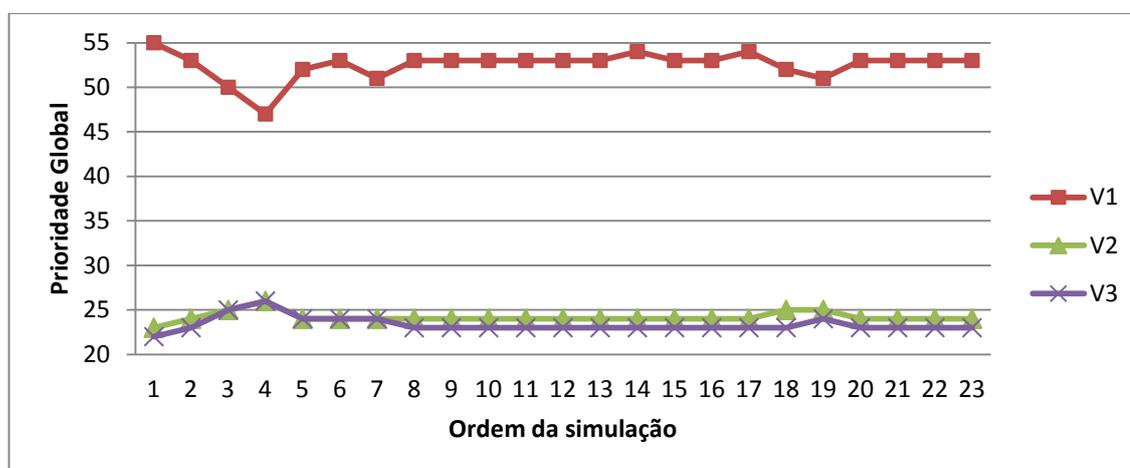


Figura 17: Análise de sensibilidade dos subcritérios

A partir dos dados apresentados na Tabela 29 e na Figura 17, foi possível concluir que a alteração dos pesos dos subcritérios não gerou expressiva alteração dos valores das prioridades globais. Foi observado que a ordem de escolha das alternativas praticamente não se alterou, visto que a primeira alternativa (V1) manteve uma margem de distâncias das outras em média de 20%, enquanto as outras duas alternativas (V2 e V3) sempre mantiveram seus valores entre 22% e 27%, garantindo uma preferência de escolha muito próxima entre V2 e V3, assim como o resultado obtido anteriormente pela aplicação dos pesos originais do estudo de caso.

Outra análise realizada foi a mudança do peso dos critérios considerados. Foi proposta uma mudança de 10, 15 e 20% nos pesos originais, de tal maneira que o problema original não fosse alterado. Percentuais acima desses valores proporcionam uma distância muito grande do problema original com o simulado, gerando análises de julgamento completamente diferente do real. Os resultados estão relacionados na Tabela 30.

Tabela 30: Resultados gerados para os diferentes pesos dos critérios do AHP-WPM

| Incremento | Pesos dos critérios (%) | Prioridade global (%) |
|-------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Original | PF=35; RV=25; SA=15; GR=15; SA=10 | 1º (53; 24; 23) |
| 10% | (45; 22,5; 12,5; 12,5; 7,5) | 2º (55; 24; 21) |
| | (32,5; 35; 12,5; 12,5; 7,5) | 3º (57; 23; 20) |
| | (32,5; 22,5; 25; 12,5; 7,5) | 4º (52; 25; 23) |
| | (32,5; 22,5; 12,5; 25; 7,5) | 5º (54; 24; 22) |
| | (32,5; 22,5; 12,5; 12,5; 20) | 6º (48; 25; 27) |
| 15% | (50; 21,25; 11,25; 11,25; 6,25) | 7º (56; 24; 20) |
| | (31,25; 40; 11,25; 11,25; 6,25) | 8º (59; 23; 19) |
| | (31,25; 21,25; 30; 11,25; 6,25) | 9º (51; 26; 14) |
| | (31,25; 21,25; 11,25; 30; 6,25) | 10º (55; 24; 22) |
| | (31,25; 21,25; 11,25; 11,25; 25) | 11º (46; 25; 29) |
| 20% | (55; 20; 10; 10; 5) | 12º (57; 24; 20) |
| | (30; 45; 10; 10; 5) | 13º (60; 22; 17) |
| | (30; 20; 35; 10; 5) | 14º (50; 26; 24) |
| | (30; 20; 10; 35; 5) | 15º (55; 24; 21) |
| | (30; 20; 10; 10; 30) | 16º (44; 25; 32) |

A partir dos dados da Tabela 30 foi possível montar o gráfico da Figura 18 contendo uma análise visual comparativa dos resultados obtidos.

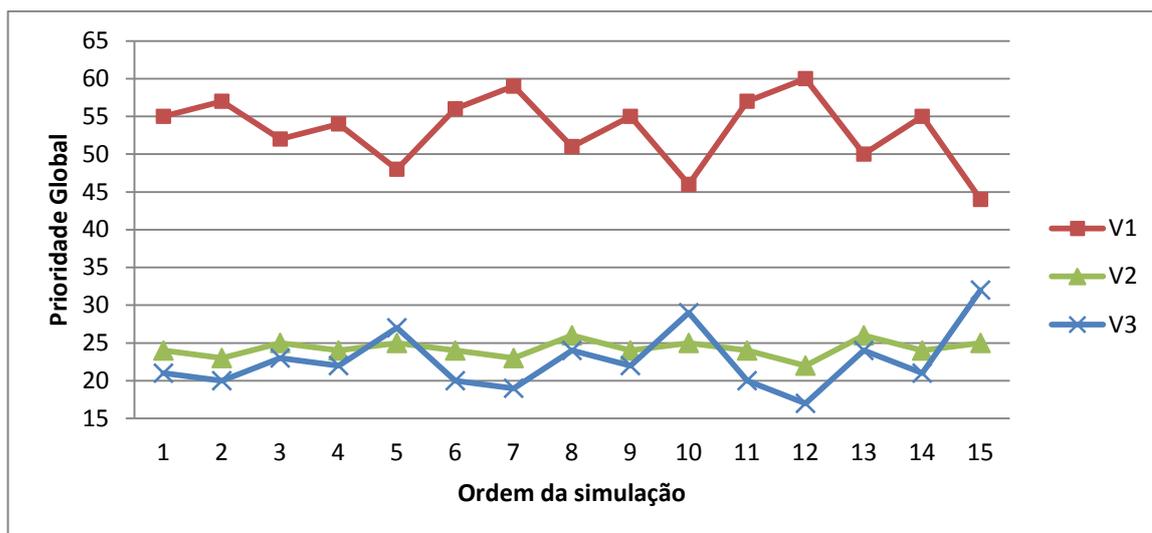


Figura 18: Análise de sensibilidade dos critérios

Analisando a Tabela 30 e a Figura 18 foi possível chegar à conclusão de que alterações de 10%, 15% e 20% dos pesos dos critérios não influenciaram significativamente o valor das prioridades globais na maioria das simulações realizadas, mudando apenas em alguns casos a ordem de V2 e V3. Quando analisadas as alterações de 20%, observa-se uma tendência de inversão de valores, caso mais simulações fossem realizadas. Este fato se confirma devido à mudança do escopo do problema caso pesos sejam mudados acima de 30%.

Uma última análise de sensibilidade deve ser realizada para avaliar os julgamentos dos subcritérios. Através da análise dos julgamentos é possível identificar se os mesmos foram realizados de modo que uma variação não altere significativamente os resultados encontrados, mostrando, assim, que os julgamentos e os resultados podem ser apresentados com segurança para a solução do problema.

Para o estudo de caso foram analisados os julgamentos referentes aos subcritérios EEA, EOE, ADN, PMD e FVU porque a soma de seus pesos representa um total de 60%. Uma análise de sensibilidade não se justifica para todos os julgamentos porque uma variação do julgamento de subcritério de pequeno peso não gera alterações no valor das prioridades globais. A partir das simulações realizadas, foi elaborada a Tabela 31.

Os dados da Tabela 31 foram gerados a partir de uma variação de $\pm 10\%$ dos julgamentos selecionados para as três alternativas, proporcionando uma variação de 20% em torno do valor avaliado, representando uma mudança significativa do julgamento.

Tabela 31: Análise de sensibilidade dos julgamentos

| Subcritério | $\Delta\%$ | V1 | V2 | V3 |
|-------------|------------|------------------|------------------|------------------|
| EEA | -10 | 1° (52; 25; 23) | 11° (53; 22; 25) | 21° (53; 24; 22) |
| | +10 | 2° (54; 24; 23) | 12° (51; 24; 24) | 22° (53; 24; 23) |
| EOE | -10 | 3° (52; 25; 23) | 13° (54; 23; 23) | 23° (54; 25; 21) |
| | +10 | 4° (55; 23; 22) | 14° (52; 26; 22) | 24° (52; 23; 24) |
| ADN | -10 | 5° (52; 23; 25) | 15° (53; 24; 23) | 25° (53; 24; 23) |
| | +10 | 6° (52; 23; 24) | 16° (53; 24; 23) | 26° (53; 24; 23) |
| PMD | -10 | 7° (52; 23; 25) | 17° (53; 24; 23) | 27° (53; 24; 23) |
| | +10 | 8° (52; 23; 24) | 18° (53; 24; 23) | 28° (53; 24; 23) |
| FVU | -10 | 9° (52; 24; 25) | 19° (54; 23; 23) | 29° (53; 24; 23) |
| | +10 | 10° (52; 23; 24) | 20° (52; 25; 23) | 30° (53; 24; 23) |

Analisando a Tabela 31 é possível inferir que, assim como nas outras análises, V1 não teve a sua posição alterada, permanecendo sempre na primeira posição de escolha. Os veículos V2 e V3 mantiveram na maior parte das simulações (18 das 30 simulações) a ordem encontrada de V2 em segundo lugar e V3 em terceiro lugar. A partir da Tabela 31 é possível a sua representação gráfica na Figura 19, na ordem em que as simulações foram geradas.

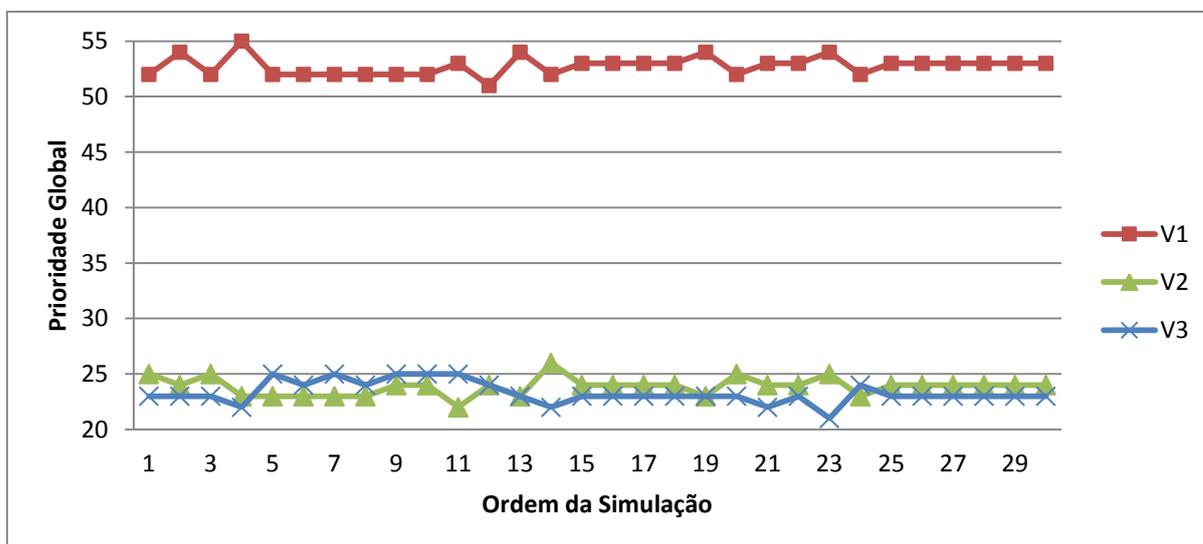


Figura 19: Gráfico da análise de sensibilidade dos julgamentos

Analisando a Figura 19 é possível ressaltar que a alteração de julgamento apenas gerou mudança nas prioridades globais dos julgamentos dos subcritérios que possuem maior

peso. Na medida em que são simulados alterações em subcritérios de baixo peso ou alternativa inferior em relação às demais (V3), não ocorre a mudança do valor simulado.

Os principais itens considerados para a análise de sensibilidade do estudo de caso foram os pesos dos subcritério e dos critérios, assim como os julgamentos realizados. Tal metodologia de análise de sensibilidade tem por objetivo avaliar o impacto de cada item do processo de avaliação para o resultado encontrado.

Como resultado global para a análise de sensibilidade do AHP-WPM aplicado ao estudo de caso, podemos concluir que o problema foi bem estruturado atendendo as expectativas de eleição de uma alternativa em relação às demais, neste caso V1. Mesmo nos casos em que ocorreu inversão de ordem entre as duas alternativas consecutivas (V2 e V3), a alternativa V1 se manteve a frente das demais.

Esse processo de análise pode ser replicado para os diferentes tipos de métodos AMD aplicados no estudo de caso, porém nas seções 5.2.2 e 5.2.3 são apresentados os itens que devem ser considerados a mais durante a análise de sensibilidade de cada método.

5.2.2 Análise de sensibilidade do Electre I

Durante a análise de sensibilidade do método Electre I devem ser considerados, além dos itens descritos na análise da seção 5.2.1, a análise do efeito da mudança dos valores dos índices de concordância e discordância “c” e “d”, respectivamente. Como os índices são gerados de maneira aleatória, de acordo com o julgamento do agente decisor, sua análise é importante para se saber o efeito de sua variação na resolução do problema. As simulações foram realizadas de forma que a concordância tenha uma maior preferência em relação à discordância, ambos começando com 50%. Os resultados encontrados estão representados na Tabela 32.

Tabela 32: Análise de sensibilidade do Electre I

| c | d | Número de Arcos | Núcleo |
|----------|----------|------------------------|---------------|
| 0,5 | 0,5 | 1 | 1 e 3 |
| 0,6 | 0,4 | 1 | 1 e 3 |
| 0,7 | 0,3 | 1 | 1 e 3 |
| 0,8 | 0,2 | 1 | 1, 2 e 3 |
| 0,9 | 0,1 | 1 | 1, 2 e 3 |

Analisando a Tabela 32 podemos concluir que em três das cinco simulações o mesmo resultado com os núcleos 1 e 3 foram encontrados. Mesmo este sendo um resultado positivo em relação a aplicação do Electre I no estudo de caso, os resultados encontrados foram inferiores em relação aos resultados encontrados pelos métodos AHP-WPM e Prométhée II porque não ocorreu uma estratificação clara das três alternativas analisadas.

7.2.3 Análise de sensibilidade do Prométhée II

Para a análise de sensibilidade do Prométhée II o mesmo processo aplicado ao AHP-WPM pode ser adaptado, avaliando-se os pesos e os julgamentos. Para o problema proposto foi elaborada a Tabela 33 contendo uma variação de 10 e 20% dos julgamentos do critério PF (prestígio do fabricante). Este critério foi escolhido porque apresenta o maior peso entre os demais (35% do total), proporcionando assim que mudanças nos julgamentos possam resultar em alterações na ordem de preferência com maior facilidade. A Tabela 33 resume os resultados encontrados.

Tabela 33: Análise de sensibilidade do Prométhée II

| 10% PF (V1; V2; V3) | | |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|
| (0,69; 0,18; 0,12) | (0,55; 0,28; 0,12) | (0,55; 0,18; 0,27) |
| 1,30 | 1,30 | 1,30 |
| -0,15 | -0,15 | -0,85 |
| -1,15 | -1,15 | -0,45 |
| 20% PF (V1; V2; V3) | | |
| (0,79; 0,13; 0,07) | (0,49; 0,43; 0,07) | (0,49; 0,13; 0,37) |
| 1,30 | 1,30 | 1,30 |
| -0,15 | -0,15 | -0,85 |
| -1,15 | -1,15 | -0,45 |

Analisando a Tabela 33, pode-se concluir que mudanças de 10% e 20% não resultaram em alterações na pré-ordem total. Este resultado se deve, principalmente, pelo fato do método Prométhée II considerar as relações de superação dos julgamentos. Assim, para que uma alternativa seja considerada melhor, seu julgamento deve ser maior do que os demais e para que tal fato aconteça no estudo de caso, a alteração dos julgamentos deve ser de mais de 30%, em média, para que aconteça a inversão de ordem.

7.3 Conclusões sobre a AMD aplicada no estudo de caso

Para a solução do problema de seleção de equipamentos de transporte para mineração, a aplicação da metodologia AMD se mostrou bastante proveitosa tendo visto que nela são contemplados métodos de auxílio à tomada de decisão com base em critérios qualitativos, sendo a relação e análise destes muito importantes para a escolha da solução mais apropriada.

Cabe ressaltar que a metodologia de utilização dos métodos AMD ajudou na elaboração e entendimento das dimensões que o problema de seleção de equipamentos envolve. A partir de tal entendimento, foi possível a estruturação e resolução do problema.

No estudo de caso, foram utilizados três métodos (AHP-WPM, Electre I e Prométhée II). Porém foi constatado que os resultados obtidos pelo Electre I não foram satisfatórios visto que não expressaram com exatidão a opinião do agente decisor. Este fato reforça a ideia de

que é necessário um profundo conhecimento dos métodos AMD para se escolher o mais indicado e que a utilização de vários métodos não agrega valor para a solução do problema.

A aplicação dos métodos não teve como objetivo a eleição do melhor método para a solução do problema mas sim relatar as experiências da aplicação de diferentes métodos mais ou menos indicados e assim gerar uma experiência diversa e comparar os resultados obtidos. Desta forma foi possível ter uma ideia dos passos a serem seguidos para a solução de outros problemas de seleção de equipamentos de transporte em minas a céu aberto.

Mesmo não tendo sucesso com a aplicação do Electre I, visto que desde o início este não era o mais indicado para o estudo de caso, os métodos AHP-WPM e Prométhée II deram resultados muito consistentes e próximos entre si, provando a utilidade da aplicação da AMD para o estudo de caso.

Como maiores contribuições para o tema de seleção de equipamentos, a AMD proporcionou uma análise sistemática do problema, possibilitando a elucidação dos pontos mais importantes a serem relacionados, além de uma metodologia de fácil entendimento, permitindo a sua replicação e modificação para outros cenários.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Historicamente, a mineração é uma atividade que depende do seu aporte tecnológico, em especial no que se refere aos equipamentos de lavra, cominuição, beneficiamento e transporte do minério lavrado para se obter o produto final com qualidades físicas e químicas desejadas.

Após a revisão sobre as etapas de um projeto de mineração, constatou-se que, assim como outros setores da economia, a mineração é uma atividade intensiva em capital, que depende do correto selecionamento e substituição de seus ativos para manter seus custos de produção competitivos a ponto de concorrer com outras empresas em um mercado global.

Desta forma, a seleção dos equipamentos para aquisição ou reposição de ativos de projetos se fazem presentes ao longo de todo o tempo de vida de uma empresa, em particular das empresas mineradoras.

Os estudos referentes à revisão bibliográfica mostraram a existência de pouco material a respeito de métodos para seleção de equipamentos na mineração. Quando tais estudos são presentes, comumente são apresentados métodos clássicos de avaliação econômica de opções de aquisição de ativos, utilizando-se conceitos como VPL e TIR, métodos estes que conseguem resolver a maioria dos casos de compra de equipamentos quando existe uma clara diferença monetária entre as alternativas avaliadas.

Constatou-se que durante a compra de equipamentos para empresas de grande porte, são avaliados requisitos técnicos para se chegar a itens de fácil controle quantitativo como taxa de disponibilidade física, utilização, rendimento operacional e capital expendido na aquisição e manutenção. Estes itens de controle e avaliação são válidos para a maioria das empresas que utilizam seus ativos até o final da vida útil do equipamento.

Para pequenas empresas, que não conseguem ter um lucro líquido elevado devido ao seu baixo volume de produção, é necessário se analisar qual o melhor ativo a ser comprado e monitorar o mesmo para se determinar o momento certo de revenda, antes que ocorram grandes custos de manutenção decorrentes do desgaste do ativo. Quanto maior forem os custos de manutenção, maior será a inviabilidade de utilização do ativo para a pequena

empresa, reduzindo ainda mais sua lucratividade e as chances de permanecer competitiva no mercado.

Na presente dissertação foi estudado uma empresa que fornece serviço logístico para transporte de ROM de uma mineradora de bauxita do estado de Minas Gerais. Para a empresa, foco do estudo, era vital para a sua sobrevivência o correto dimensionamento de sua frota de caminhões (rodoviários adaptados para mineração) de tal forma que a presente quantidade de unidades fosse capaz de atender a atual demanda de transporte de minério contratado, com capacidade para demandas extras de produção (sazonais). Neste sentido, o trabalho contribuiu para determinar qual o equipamento está melhor preparado para a tarefa, gerando menor custo.

Além do correto dimensionamento do tipo de equipamento e do tamanho da frota, para a empresa continuar competitiva e poder praticar as margens de lucro atuais, é importante a determinação do tempo de uso ótimo do ativo, a fim de se revender o equipamento já tendo pago o investimento inicial e evitando-se o gasto com as manutenções de alto custo decorrentes da avançada idade da frota.

A estratégia de se manter uma frota com a menor idade econômica possível permite que a empresa tenha um baixo custo operacional por tonelada transportada, e uma maior liquidez de venda do seu ativo, comparada com uma empresa que utiliza seus equipamentos até o final da vida útil. O fator *liquidez dos ativos* garante que em momento de crise econômica seja mais fácil vender seus equipamentos, diminuindo prejuízos e garantindo a sobrevivência da empresa.

Tendo relatado algumas estratégias de gestão de ativos que a empresa foco do estudo de caso utiliza, é necessário um modelo de estudo gerencial que considere não apenas os métodos clássicos de avaliação de alternativas, mas também os critérios considerados importantes para a aquisição, operação e substituição dos equipamentos que são vitais para a empresa.

Considerando estes desafios da gestão de ativos, foi utilizada a metodologia de Auxílio Multicritério à Decisão (AMD) como base para estruturar o modelo de tomada de decisão. O AMD foi utilizado porque proporciona:

- a utilização de dados qualitativos e quantitativos para se estruturar o modelo de decisão;
- a escolha de um método dentro da metodologia AMD de acordo com o resultado esperado, permitindo ordenar, separar em grupos, classificar entre outros;
- a flexibilidade para utilização das etapas definidas para cada método, de acordo com as necessidades de cada problema;
- a análise dos dados obtidos e simulação do efeito de cada julgamento e critério utilizado para o resultado obtido;
- o desempate e eleição de uma ou mais alternativas que possuam valor econômico igual ou muito próximo do ponto de vista do agente tomador de decisões;
- a valorização dos dados do passado permite que a experiência de cada parte afetada pela decisão de um problema enriqueça o processo de decisão.

Para a seleção do método AMD e solução do estudo de caso, foram estudados os métodos das escolas francesa e americana de pesquisa no AMD. Selecionou-se os métodos AHP-WPM, uma variante do método AHP-Clássico, representante da Escola Americana, e o Electre I e Prométhée II, representantes da Escola Francesa. A escolha desses três métodos ocorreu por serem representantes das três “famílias” de métodos mais estudados e presentes na literatura técnica e de fácil entendimento dos princípios básicos que norteiam a aplicação de cada método.

Utilizando como critérios do agente decisor a capacidade de carga, o sistema de tração e a experiência de utilização dos caminhões rodoviários adaptados, foi determinado que no mercado existem três alternativas de veículos que atendem às exigências de trabalho a um custo de aquisição e operação muito próximos do ponto de vista do agente decisor. Como não foi objetivo deste estudo exaltar ou denegrir a imagem de nenhuma empresa, os modelos de caminhão foram denominadas genericamente de V1, V2 e V3 em respeito às montadoras.

A partir de reuniões com a equipe de gestores da parte administrativa, diretoria e manutenção do operador logístico foi determinado que cinco critérios devem ser considerados e desdobrados em 12 subcritérios, com seus respectivos pesos na função objetivo. Os critérios e subcritérios são:

- **prestígio do fabricante** - desdobrado nos subcritérios: experiência de uso do equipamento atual, experiência de outras empresas e adaptação ao novo;

- **facilidade de revenda** - desdobrado nos subcritérios: percentual médio de desvalorização e facilidade de venda do usado;
- **serviço autorizado** - desdobrado nos subcritérios: distância da autorizada até a mina e instalações da autorizada;
- **garantias** - desdobrado nos subcritérios: garantia do equipamento novo, garantia estendida ou seguro, garantia da autorizada;
- **custo de aquisição** - desdobrado nos subcritérios: valor de aquisição do ativo e facilidades de financiamento.

Na Tabela 7 há um quadro-resumo da relação de cada critério e seus respectivos subcritérios e pesos considerados.

Após a análise dos resultados obtidos, existem evidências de que os critérios “serviço autorizado” e “garantia” mostraram não ser diferenciadores no presente processo de decisão. Tais critérios foram utilizados por terem sido considerados de grande importância para o agente decisor, devendo ser também considerado em outros processos de decisão.

A partir da revisão bibliográfica sobre a aplicação dos métodos AMD, foi constatado que a utilização de mais de um método para a solução de um mesmo problema não é recomendável, porque se pode gerar resultados divergentes e um retrabalho desnecessário para se compilar todos os dados.

Mesmo sabendo dessa premissa, foram utilizados dois métodos mais indicados para o problema de seleção de uma alternativa, o AHP-WPM e Prométhée II, por determinarem o grau de preferência das alternativas segundo o julgamento do agente decisor e outro não indicado para o problema, o Electre I, pois ele não determina o grau de preferência de uma alternativa em relação às demais, apenas seleciona as mais aptas. O Electre I foi utilizado para se mostrar um resultado não desejado para a resolução do problema objeto do estudo de caso.

Foi verificado que durante o processo de avaliação do método AHP-WPM ocorreram dificuldades na avaliação de cada subcritério separadamente, descartando a influência de um sobre o outro. Tal problema poderia ter sido evitado se os subcritérios tivessem sido caracterizados de forma a impedir a influência de um sobre o outro na hora de avaliação.

Após a utilização dos três métodos verificou-se que o AHP-WPM e Prométhée II geraram resultados satisfatórios para o problema, proporcionando respostas em que a ordem

de preferência expressa com exatidão a opinião do agente decisor. Conclui-se que a alternativa V1 é muito superior às demais, e a alternativa V2 como ligeiramente superior em relação à V3. O Electre I gerou um resultado de pouca expressão para a solução do problema porque coloca duas alternativas em um mesmo nível de escolha (alternativa V1 e V3) e não determina nenhum grau de separação entre as alternativas.

Observa-se, com base no que foi analisado, que a metodologia de auxílio multicritério à decisão possui um grande potencial de aplicação em empresas mineradoras. Com efeito, devido ao fato de que essas empresas, assim como inúmeras outras, têm que lidar com um grande número de fatores que se relacionam e não são apenas de caráter financeiro ou quantitativo, mas, sim, de caráter qualitativo, tornando difícil a escolha da alternativa mais adequada.

Após a análise do exemplo de aplicação do AMD, podemos destacar a dificuldade sobre a tomada de decisão em cenários complexos e representação lógica para os seus envolvidos, fazendo desses dois fatores a razão principal de aplicação do AMD. Dessa maneira o AMD tem um papel decisivo no auxílio no momento de avaliação e escolha da alternativa a ser selecionada e implementada.

O estudo de caso considerado não teve o intuito de determinar o melhor modelo/marca de caminhão rodoviário a ser empregado em minerações de pequeno porte. O foco principal foi a determinação de uma nova perspectiva no processo de tomada de decisão para seleção de equipamentos de mineração. O modelo proposto (tomadas às devidas proporções de adaptação e aquisição de dados) tem a finalidade de poder ser empregado em outros processos de aquisição de equipamentos.

Cabe ressaltar que grande parte da avaliação e seleção dos critérios de julgamento das possíveis alternativas a serem selecionadas, estão relacionadas às experiências prévias dos atores envolvidos no processo de decisão. Assim, a experiência de uma pessoa determina a importância relativa de um critério de avaliação em relação a outro.

Mesmo nos últimos estágios, ao término do processo de tomada de decisão, uma última avaliação a ser considerada é se a alternativa escolhida tem condições reais de ser implementada. Este fato mostra a flexibilidade que a metodologia AMD proporciona, possibilitando se adaptar à medida que informações sejam acrescentadas ou alteradas.

Este trabalho incentiva, assim, a utilização da ferramenta AMD, amplamente empregada em outras áreas do conhecimento (engenharia, economia, agricultura, política, entre outros), porém pouco aplicada na mineração, em especial na seleção de equipamentos de lavra a céu aberto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, L. H., ALMEIDA, A. T. de. Multicriteria decision group model for the selection of suppliers. **Pesquisa Operacional**, v. 28, n. 2, p. 321 - 337, mai / ago de 2008.
- ALENCAR, L. H., ALMEIDA, A. T. de. A model for selecting project team members using multicriteria group decision making. **Pesquisa Operacional**, v.30, n.1, p. 221-236, jan / abr de 2010.
- ALMEIDA, A. T. de, ALENCAR, L. H., MIRANDA, C. M. G. de. Mining methods selection based on multicriteria models. **Proceedings of the 32nd International Symposium of the Applications of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM 2005)**. Tucson, USA, 30 de março - 1 abril, 2004. Editora A.A. Balkema. p. 19 - 24, 2005.
- ALMEIDA, A. T. de. Multicriteria decision model for outsourcing contracts selection based on utility function and ELECTRE method. **Computers & Operations Research**, v. 34, p. 3569 - 3574, 2007.
- BANA, C. A., COSTA, C. A. The use of multi-criteria decision analysis to support the search for less conflicting policy options in a multi - actor context: Case study. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 10, p. 111 - 125, 2001.
- BANA, C. A., COSTA, C. A., STEWART, T., VASNICK, J. C. Multicriteria decision analysis: some thoughts based on the tutorial and discussion sessions of the esigma meetings. **14th European Conference on Operational Research**, july, 1995.
- BARROS, M. T. S., ENSSLIN, L., ENSSLIN, S. R., PETRI, S. Um modelo com abordagem construtivista para a identificação do perfil de desempenho dos docentes de uma instituição de ensino no Estado de Sergipe. In: Simpósio pedagógico e pesquisas em educação, 13, 2006, Bauru. **Anais...** Bauru: n. c., 2006. p. 1 - 12.
- BASÇETIN, A., OZTAS, O., KANLI, A. I. EQS: a computer software using fuzzy logic for equipment selection in mining engineering. **The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy**. v. 106, p 63 - 70, january 2006.

- BELTON, V., ACKERMANN, F. Integrated support from problem structuring through to alternative evaluation using COPE and VISA. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 6, p. 115 - 1430, 1997.
- BELTON, V. GEAR, T. On a short-coming of Saaty's method of analytic hierarchies. **Omega**. v. 11, p. 228 - 230, 1983.
- BOTS, P. W. G.; HULSHOF, J. A. M. Designing multi-criteria decision analysis processes for priority setting in health policy. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 9, p. 56 - 75, 2000.
- BOUYSSOU, D. Building Criteria: A prerequisite for MCDA. In: Readings in multiple criteria decision aid, Springer: Verlag, p. 58 - 80, 1990.
- BRUGHA, C. M. An introduction to the Priority-Pointing Procedure. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 9, p. 227 - 242, 2000.
- BURNAZ, S., TOPCU, Y. I. A multiple-criteria decision-making approach for the evaluation of retail location. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 14, p. 67 - 76, 2006.
- ČANČER, V., MULEJ, M. The dialectical systems theory's capacity for multi-criteria decision-making. **Systems Research and Behavioral Science**. v. 27, p. 285 - 300, 2010.
- CATERPILLAR. **Manual de produção Caterpillar**. 39ª edição. 2009.
- CAVALCANTE, C. A. V., ALMEIDA, A. T. de. Modelo multicritério de apoio a decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando PROMETHEE II em situações de incerteza. **Pesquisa Operacional**, v.25, n.2, p. 279-296, mai / ago de 2005.
- CORNER, J., BUCHANAN, J., HENIG, M. Dynamic decision problem structuring. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 10, p. 129 - 141, 2001.
- COSTA, H. G. **Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão**. UFF, Niterói, 2002.
- CURI, A. Entrevista realizada com o professor do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto em setembro de 2010.

- DNPM. **Tributação da Mineração no Brasil: Análise da situação atual e das mudanças propostas na reforma tributária.** Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=368 Acessado em 22/06/2010.
- DOOLEY, A. E., SMEATON, D.C., SHEATH, G.W., LEDGARD, S.F. Application of multiple criteria decision analysis in the New Zealand agricultural industry. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis.** v. 16, p. 39 - 53, 2009.
- DUTRA, A. Sistema de avaliação de desempenho das secretarias de desenvolvimento regional do governo do estado de Santa Catarina: resultados preliminares da aplicação de um modelo construtivista. In: Encontro de administração pública e governança, 2008, **Anais...** Salvador: ANPAD, p. 1 - 16, 2008.
- ENSSLIN, S. R. *et al.* Uma metodologia multicritério (MCDA-C) para apoiar o gerenciamento do capital intelectual organizacional. **Revista de administração mackenzie**, v. 9, n. 7, nov./dez. 2008.
- EOM, S. B., MIN, H. The Contributions of multi-criteria decisionmaking to the development of decision support systems subspecialties: An empirical investigation. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis.** v. 8, p. 239 - 255, 1999.
- FERREIRA, G. E., ANDRADE, J. E. Elaboração e avaliação econômica de projetos de mineração. Capítulo 20. **Tratamento de Minérios - CETEM.** 4ª edição, editora CETEM, Rio de Janeiro, p. 816 - 850, 2004.
- FIGUEIRA, J., GRECO, S., EHRGOTT, M. (Eds.) **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys**, Springer, New York, 2004.
- FIPE. <http://www.fipe.org.br/web/index.asp?aspx=/web/indices/veiculos/introducao.aspx> Acessado em 08/02/2011.
- FISHBURN, P. C., LAVALLE, I. H. MCDA: Theory, practice and the future. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis.** v. 8, p. 1 - 2, 1999.
- GELDERMANN, J., RENTZ, O. Multi-criteria analysis for technique assessment. **Journal of Industrial Ecology.** v. 9, n. 3, p. 127 - 142, 2005.
- GENTRY, D.W, O'Neil, T. J. **Mine Investment Analysis.** SME, 1979.

- GOMES, C. F. S. Using MCDA methods THOR in an application for outranking the ballast water management options. **Pesquisa Operacional**. v. 25, p. 11 - 28, 2005.
- GOMES, L. F. A. M., ARAYA, M. C. G., CARIGNANO, C. **Tomada de decisões em cenários complexos**. 1ª edição. Editora Thomson. 168p. 2004.
- GOMES, L. F. A. M., GOMES, C. F. S., ALMEIDA, A. T. de. **Tomada de decisão gerencial – Enfoque multicritério**. 3ª edição. Editora Atlas. 324p. 2009a.
- GOMES, L. F. A. M., GOMES, C. F. S., RANGEL, L. A. D. A comparative decision analysis with THOR and TODIM: Rental evaluation in Volta Redonda. **Revista Tecnológica de Fortaleza**. v. 30, p. 7 - 11, 2009b.
- GONÇALVES, R. W., PINHEIRO, P. R., FREITAS, M. A. de S. **Métodos multicritérios como auxílio à tomada de decisão na bacia hidrográfica do rio Curu – Estado do Ceará**. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/ProducaoAcademica/Marcos%20Airton%20de%20S.%20Freitas/M%E9todos%20multi%20crit%E9rios.pdf>> Acesso em: 22/11/2010.
- GONTIJO, C. de B. L. M. Estudo de variáveis relevantes que interferem na seleção dos modelos de caminhões para transporte de minério. **Programa de Especialização em Sistemas Minero-Metalúrgico**. Monografia, UFOP, 2009.
- GRABISCH, M. How to score alternatives when criteria are scored on an ordinal scale. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 15, p. 31 - 44, 2008.
- HADLEY, C. F., SCHONER, B. WEDLEY, W. C. A field experiment comparing anchored and unanchored criteria weights in the analytic hierarchy process. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 6, p. 140 - 149, 1997.
- HALLERBACH, W. F., SPRONK, J. The relevance of MCDM for financial decisions. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 11, p. 187 - 195, 2002.
- HARTMAN, H. L. **SME mining engineering handbook**. 2ª edição. Editora SME. Littleton, Colorado. v. 1, p. 28 - 31, 1992.
- HARTMAN, H. L., MUTMANSKY, J. M. **Introductory mining engineering**. 2ª edição. 2002. Editora John Wiley and Sons, inc. Hoboken, New Jersey. p. 5 - 18.

- HAVEN, E. E. The fuzzy multi-criteria analysis method: An application on NVP ranking. **International Journal of Intelligent Systems in Accounting, Finance & Management**. v. 7, p. 243 - 252, 1998.
- HENIG, M. I., BUCHANAN, J. T. Solving MCDM Problems: Process concepts. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 5, p. 3 - 21, 1996.
- HENIG, M. I., KATZ, H. R&D Project Selection: A decision process approach. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 5, p. 169 - 177, 1996.
- HUSTRULID, W., KUCHTA, M. **Open Pit Mine Planning & Design**. Volume 1- Fundamentals. 2ª Edição. Editora A. A. Balkema, Rotterdam. p. 95-96, 1998.
- HYDE, K., MAIER, H. R., Colby, C. Incorporating uncertainty in the PROMETHEE MCDA method. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 12, p. 245 - 259, 2003.
- INFOMINE. **Mine & Mill Equipment Costs Estimator's Guide: Capital & Operating Costs**. Disponível em: <http://costs.infomine.com/mineequipmentcosts/>. Acessado em: 15/04/2011.
- JANNUZZI, P. de M., MIRANDA, W. L. de, SILVA, D. S. G. da. Análise multicritério e tomada de decisão em Políticas Públicas: Aspectos metodológicos, aplicativo operacional e aplicações. **Informática Pública** ano. v. 1, p. 69 - 87, 2009.
- JURAN, J. M., GODFREY, A. B. **Juran's Quality Handbook**. McGraw - Hill. 5ª Edição, 1999.
- KANGAS, J. *et al.* MCDM methods in strategic planning of forestry on state-owned lands in Finland: Applications and experiences. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 10, p. 257 - 271, 2001.
- KARACAPILIDIS, N., VOUIROS, G., DARZENTAS, J. Applying intelligent agents technology in a collaborative work environment. **International Transactions in Operational Research**. v. 10, p. 13 - 31, 2003.
- KAUFMANN, B. E. Emotional arousal as a source of bounded rationality. **Journal of Economics Behavior & Organization**, nº38, p. 135 - 144, 1999.

- LAHDELMA, R., SALMINEN, P. SMAA-II: Stochastic multicriteria acceptability analysis for group decision making. **Operational Research**, v. 49, n. 3, p. 444 - 454, mai / jun de 2001.
- LEE, E. K., HA, S., KIM, S. K. Supplier selection and management system considering relationships in supply chain management. **IEEE Transactions on Engineering Management**. v. 48, n. 3, p. 307 - 318, ago 2001.
- LIMA, M. V. A. de, FILARDI, F., LOPES, A. L. M. Avaliação multicritério do risco percebido dos fatores contribuintes para a mortalidade precoce de micro e pequenas empresas no Brasil. In: Simpósio de administração da produção, logística e operações internacionais, 12, 2009, São Paulo. **Anais**. São Paulo, 2009a. p. 1 - 16.
- LIMA, M. V. A. de, LOPES, A. L. M., DUTRA, A. Contribuição da metodologia multicritério de apoio à decisão no método do fluxo de caixa descontado usado para avaliar empresas de pequeno porte. **Revista Gestão Industrial**. v. 05, n. 03, p. 136 - 154, 2009b.
- LOOTSMA, F. A. MCDA, a new technology. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 5, p. 245 - 246, 1996.
- LOOTSMA, F. A., SCHUIJT, H. The multiplicative AHP, SMART and ELECTRE in a common context. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 6, p. 185 - 196, 1997.
- LOPES, J. R. **Viabilização técnica e econômica da lavra contínua de minério de ferro com uso de sistema de britagem móvel “in pit” auto propelido**. Ouro Preto: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, 2010. 105p. (Dissertação de Mestrado).
- LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais de para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006. 142p. (Dissertação de Mestrado).
- MARTIN, J. W., MARTIN, T.J., BENNET, T. P., MARTIN, K. M. **Surface Mining Equipment**. Editora Martin consultants Inc. Colorado. 1982.

- MÉLON, M. G., PERERA, A. S., BAUTISTA, R. P., FERNANDO, J. P. P. Project prioritisation for portfolio selection based on the analytic network process. In: Proceedings of the international symposium on the Analytic Hierarchy Process, 10, 2009, Pittsburgh. **Annals...** Pittsburgh, 2009. p. 28 - 44.
- MERITOR. Disponível em: <http://meritor.com/products/aftermarket/southamerica/portuguese/solutions/default.aspx> Acesso em: 26/10/2010.
- MILKMAN, K. L., CHUGH, D., BAZERMAN, M. H. How Can Decision Making Be Improved? **A Journal of the Association for Psychological Science: Perspectives on psychological Science**. v. 4, p. 379 - 383, 2009.
- MONNIKHOFF, R. A. H. ;BOTS, P. W. G. On the application of MCDA in interactive spatial planning processes: Lessons learnt from two stories from the swamp. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 9, p. 28 - 44, 2000.
- MONTIBELLER, G., GUMMER, H., TUMIDEI, D. Combining scenario planning and multi-criteria decision analysis in practice. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 14, p. 5 - 20, 2006.
- MORAIS, D. C.; ALMEIDA, A. T. de. Modelo de decisão em grupo para gerenciar perdas de água. **Pesquisa Operacional**, v. 26, n. 3, p. 567 - 584, set./dez. 2006.
- O'HARA, T. A.; SUBOLESKI, S. C. **SME Mining Engineering Handbook**. 2nd Edition. vol 2, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, p. 406 - 407, 1996.
- PARK, K. S. Mathematical programming models for characterizing dominance and potential optimality when multicriteria alternative values and weights are simultaneously incomplete. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans**. v. 34, n. 5, p. 601 - 614, set 2004.
- PASCHETTA, E.; TSOUKIÀS, A. A real-World MCDA application: Evaluating software. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 9, p. 205 - 226, 2000.
- PERNY, P. Theoretical foundations of MCDA. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 5, p. 79 - 80, 1996.
- PODINOVSKI, V. V. The quantitative importance of criteria for MCDA. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 11, p. 1 - 15, 2002.

- REVUELTA, M. B., JIMENO, C. L. **Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras**. Editora Entorno Gráfico. Mostoles, Madrid. p. 397 - 404, 1997.
- RICHARDS, M., WEST, S. Fundamentals of earthmoving. **LACD Mining Equipment Forum**. Calama, Chile. November 2003.
- ROSQVIST, T. Simulation and multi-attribute utility modelling of life cycle profit. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 10, p. 205 - 218, 2001.
- ROY, B., MOUSSEAU, V. A theoretical framework for analyzing the notion of relative importance of criteria. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 5, p. 145 - 159, 1996.
- SALO, A., GUSTAFSSON, T., RAMANATHAN, R. Multicriteria methods for technology foresight. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 22, p. 235 - 255, 2003.
- SILVA, V. C. e. Entrevista realizada com o professor do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto em outubro de 2010.
- SMITH, D. Publicado em 1º de dezembro de 2008. Disponível em: <<http://blogs.redding.com/dsmith/archives/2008/12/found-a-big-pie.html>>. Acessado em: 12/04/2009.
- SCHMIDT, A. M. A. **Processo de apoio à tomada de decisão - Abordagens: AHP e MACBETH**. Florianópolis: Programa de pós-graduação em engenharia de produção. Universidade Federal de Santa Catarina, 1995 (Dissertação de Mestrado).
- SCHONER, B. WEDLEY, W. C. Ambiguous criteria weights in AHP: consequences and solutions. **Decision Science**. v. 20, p. 462 - 475, 1989.
- SOUZA, P. Á. de. **Avaliação econômica de projetos de mineração. Análise de sensibilidade e análise de risco**. 1ª edição, 1995. Editora IETEC, Belo Horizonte. p. 115 - 185.
- STEUER, R. E. GARDINER, L. R, GRAY, J. A bibliographic survey of the activities and international nature of multiple criteria decision making. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 5, p. 145 - 217, 1996.
- STEWART, T. J. Robustness of additive value function methods in MCDM. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 5, p. 301 - 309, 1996.

- TERVONEN, T., FIGUEIRA, J. R. A survey on stochastic multicriteria acceptability analysis methods. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 15, p. 1 - 14, 2008.
- TRANTAPHYLLOU, E. Two new cases of rank reversals when the AHP and some of its additive variants are used that do not occur with the multiplicative AHP. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 10, p. 11 - 25, 2001.
- VARGAS, L. G. An overview of the analytic hierarchy process and its applications. **European Journal of Operational Research**. v. 48, p. 2 - 8, 1990.
- XINCHUN, L., YOU DI, Z. Mineral resource evaluation based on AHP. **Mine Planning and Equipment Selection**. Editora Taylor & Francis Group, London. p. 85 - 90, 2004.
- XU, D. L., YANG, J. B. Intelligent Decision System for Self-Assessment. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 12, p. 43 - 60, 2003.
- WATSON, S.R., FREELING, A.N.S. Assessing Attribute Weights by Ratios. **Omega**. v. 10, n. 6, p. 582-585, 1982.
- WENSTOP, F. Mindsets, rationality and emotion in multi-criteria decision analysis. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 13, p. 161 - 172, 2005.
- WHITE, C. C., HOLLOWAY, H. A. Resolvability for imprecise multiattribute alternative selection. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans**. v. 38, n. 1, p. 162 - 169, jan 2008.
- ZAPATERO, E. G. Evaluating multiple-attribute decision support systems. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 6, p. 201 - 214, 1997.
- ZOPOUNIDIS, C., DOUMPOS, M. Multi-criteria decision aid in financial decision making: Methodologies and literature review. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**. v. 11, p. 167 - 186, 2002.

ANEXO I - DETERMINAÇÃO DO PERÍODO ÓTIMO PARA TROCA DE ATIVO

Através do método do mínimo múltiplo comum (MMC) apresentado na seção 5.5.2, foi realizada a análise, em parceria com a empresa foco do estudo, para se determinar um período ótimo de troca de equipamento, analisando-se as possibilidades de troca com três ou cinco anos.

| Ano | 5 Anos | | 3 Anos | |
|--------------|---|-------------------------|---|-------------------------|
| | | Lucro líquido | | Lucro líquido |
| 1 | Aquisição: +R\$220.000,00 – R\$368.000,00 | R\$198.713,20 | Aquisição: +R\$220.000,00 – R\$368.000,00 | R\$198.713,20 |
| 2 | | R\$ 183.292,44 | | R\$ 183.292,44 |
| 3 | | R\$ 166.158,27 | | R\$ 166.158,27 |
| 4 | | R\$ 147.120,30 | Aquisição: +R\$288.000,00 – R\$368.000,00 | R\$ 198.713,20 |
| 5 | | R\$ 125.967,00 | | R\$ 183.292,44 |
| 6 | Aquisição: +R\$248.000,00 – R\$368.000,00 | R\$ 198.713,20 | | R\$ 166.158,27 |
| 7 | | R\$ 183.292,44 | Aquisição: +R\$288.000,00 – R\$368.000,00 | R\$ 198.713,20 |
| 8 | | R\$ 166.158,27 | | R\$ 183.292,44 |
| 9 | | R\$ 147.120,30 | | R\$ 166.158,27 |
| 10 | | R\$ 125.967,00 | Aquisição: +R\$288.000,00 – R\$368.000,00 | R\$ 198.713,20 |
| 11 | Aquisição: +R\$248.000,00 – R\$368.000,00 | R\$ 198.713,20 | | R\$ 183.292,44 |
| 12 | | R\$ 183.292,44 | | R\$ 166.158,27 |
| 13 | | R\$ 166.158,27 | Aquisição: +R\$288.000,00 – R\$368.000,00 | R\$ 198.713,20 |
| 14 | | R\$ 147.120,30 | | R\$ 183.292,44 |
| 15 | | R\$ 125.967,00 | | R\$ 166.158,27 |
| TOTAL | | R\$ 2.075.750,00 | | R\$ 2.112.815,00 |

A partir dos resultados apresentados foi possível concluir que o tempo ideal de um caminhão rodoviário operar em uma mina é de 3 anos, não somente pela margem de lucro ser maior (apenas 1,8% equivalentes a R\$37.065,00), mais também pelas oportunidades de negócio que se cria quando se tem um capital imobilizado por um período de tempo mais curto, diminuindo assim os risco iminentes do negócio.

ANEXO II - MEMORIAL DE CÁLCULO DO AHP-WPM

Tabela 34: Matriz normalizada para o subcritério EEA

| EEA | V1 | V2 | V3 |
|------------|--|--|------------------------------|
| V1 | $\frac{1}{1 + \frac{1}{5} + \frac{1}{7}} = 0,74$ | $\frac{5}{5 + 1 + \frac{1}{3}} = 0,79$ | $\frac{7}{7 + 3 + 1} = 0,64$ |
| V2 | $\frac{1/5}{1 + \frac{1}{5} + \frac{1}{7}} = 0,15$ | $\frac{1}{5 + 1 + \frac{1}{3}} = 0,16$ | $\frac{3}{7 + 3 + 1} = 0,27$ |
| V3 | $\frac{1/7}{1 + \frac{1}{5} + \frac{1}{7}} = 0,11$ | $\frac{1/3}{5 + 1 + \frac{1}{3}} = 0,05$ | $\frac{1}{7 + 3 + 1} = 0,09$ |

Prioridades médias locais para EEA, equação (38).

$$PML_{EEA} = \left(\frac{0,74 + 0,79 + 0,64}{3} ; \frac{0,15 + 0,16 + 0,27}{3} ; \frac{0,11 + 0,05 + 0,09}{3} \right) \\ = (0,72 ; 0,19 ; 0,08) \quad (38)$$

Prioridades intermediárias para EEA, equação (39).

$$PI_{EEA} = (0,72 \times 0,6 ; 0,19 \times 0,6 ; 0,08 \times 0,6) = (0,43 ; 0,12 ; 0,05) \quad (39)$$

Tabela 35: Matriz normalizada para o subcritério EOE

| EOE | V1 | V2 | V3 |
|------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| V1 | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ |
| V2 | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ |
| V3 | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ |

Prioridades médias locais para EOE, equação (40).

$$PML_{EOE} = \left(\frac{0,33 + 0,33 + 0,33}{3} ; \frac{0,33 + 0,33 + 0,33}{3} ; \frac{0,33 + 0,33 + 0,33}{3} \right) \\ = (0,33 ; 0,33 ; 0,33) \quad (40)$$

Prioridades intermediárias para EOE, equação (41).

$$PI_{EOE} = (0,33 \times 0,3 ; 0,33 \times 0,3 ; 0,33 \times 0,3) = (0,1 ; 0,1 ; 0,1) \quad (41)$$

Tabela 36: Matriz normalizada para o subcritério ADN

| ADN | V1 | V2 | V3 |
|-----|---|-----------------------------|-----------------------------|
| V1 | $\frac{1}{1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}} = 0,6$ | $\frac{3}{3 + 1 + 1} = 0,6$ | $\frac{3}{3 + 1 + 1} = 0,6$ |
| V2 | $\frac{1/3}{1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}} = 0,2$ | $\frac{1}{3 + 1 + 1} = 0,2$ | $\frac{1}{3 + 1 + 1} = 0,2$ |
| V3 | $\frac{1/3}{1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}} = 0,2$ | $\frac{1}{3 + 1 + 1} = 0,2$ | $\frac{1}{3 + 1 + 1} = 0,2$ |

Prioridades médias locais para ADN, equação (42).

$$PML_{ADN} = \left(\frac{0,6 + 0,6 + 0,6}{3} ; \frac{0,2 + 0,2 + 0,2}{3} ; \frac{0,2 + 0,2 + 0,2}{3} \right) \quad (42)$$

$$= (0,6 ; 0,2 ; 0,2)$$

Prioridades intermediárias para ADN, equação (43).

$$PI_{ADN} = (0,6 \times 0,1 ; 0,2 \times 0,1 ; 0,2 \times 0,1) = (0,06 ; 0,02 ; 0,02) \quad (43)$$

Tabela 37: Matriz normalizada para o subcritério PMD

| PMD | V1 | V2 | V3 |
|-----|--|--|------------------------------|
| V1 | $\frac{1}{1 + \frac{1}{5} + \frac{1}{7}} = 0,74$ | $\frac{5}{5 + 1 + \frac{1}{3}} = 0,79$ | $\frac{7}{7 + 3 + 1} = 0,64$ |
| V2 | $\frac{1/5}{1 + \frac{1}{5} + \frac{1}{7}} = 0,15$ | $\frac{1}{5 + 1 + \frac{1}{3}} = 0,16$ | $\frac{3}{7 + 3 + 1} = 0,27$ |
| V3 | $\frac{1/7}{1 + \frac{1}{5} + \frac{1}{7}} = 0,11$ | $\frac{1/3}{5 + 1 + \frac{1}{3}} = 0,05$ | $\frac{1}{7 + 3 + 1} = 0,09$ |

Prioridades médias locais para PMD, equação (44).

$$PML_{PMD} = \left(\frac{0,74 + 0,79 + 0,64}{3} ; \frac{0,15 + 0,16 + 0,27}{3} ; \frac{0,11 + 0,05 + 0,09}{3} \right) \quad (44)$$

$$= (0,72 ; 0,19 ; 0,08)$$

Prioridades intermediárias para PMD, equação (45).

$$PI_{PMD} = (0,72 \times 0,2 ; 0,19 \times 0,2 ; 0,08 \times 0,2) = (0,14 ; 0,04 ; 0,02) \quad (45)$$

Tabela 38: Matriz normalizada para o subcritério FVU

| FVU | V1 | V2 | V3 |
|------------|--|--|------------------------------|
| V1 | $\frac{1}{1 + \frac{1}{5} + \frac{1}{9}} = 0,76$ | $\frac{5}{5 + 1 + \frac{1}{3}} = 0,79$ | $\frac{9}{9 + 3 + 1} = 0,69$ |
| V2 | $\frac{1/5}{1 + \frac{1}{5} + \frac{1}{9}} = 0,15$ | $\frac{1}{5 + 1 + \frac{1}{3}} = 0,16$ | $\frac{3}{9 + 3 + 1} = 0,23$ |
| V3 | $\frac{1/9}{1 + \frac{1}{5} + \frac{1}{9}} = 0,08$ | $\frac{1/3}{5 + 1 + \frac{1}{3}} = 0,05$ | $\frac{1}{9 + 3 + 1} = 0,08$ |

Prioridades médias locais para FVU, equação (46).

$$PML_{FVU} = \left(\frac{0,76 + 0,79 + 0,69}{3} ; \frac{0,15 + 0,16 + 0,23}{3} ; \frac{0,08 + 0,05 + 0,08}{3} \right) \quad (46)$$

$$= (0,75 ; 0,18 ; 0,07)$$

Prioridades intermediárias para FVU, equação (47).

$$PI_{FVU} = (0,75 \times 0,8 ; 0,18 \times 0,8 ; 0,07 \times 0,8) = (0,6 ; 0,14 ; 0,06) \quad (47)$$

Tabela 39: Matriz normalizada para o subcritério DAM

| DAM | V1 | V2 | V3 |
|------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| V1 | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ |
| V2 | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ |
| V3 | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ |

Prioridades médias locais para DAM, equação (48).

$$PML_{DAM} = \left(\frac{0,33 + 0,33 + 0,33}{3} ; \frac{0,33 + 0,33 + 0,33}{3} ; \frac{0,33 + 0,33 + 0,33}{3} \right) \quad (48)$$

$$= (0,33 ; 0,33 ; 0,33)$$

Prioridades intermediárias para DAM, equação (49).

$$PI_{DAM} = (0,33 \times 0,5 ; 0,33 \times 0,5 ; 0,33 \times 0,5) = (0,17 ; 0,17 ; 0,17) \quad (49)$$

Tabela 40: Matriz normalizada para o subcritério IDA

| IDA | V1 | V2 | V3 |
|------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| V1 | $\frac{1}{1+1+1} = 0,33$ | $\frac{1}{1+1+1} = 0,33$ | $\frac{1}{1+1+1} = 0,33$ |
| V2 | $\frac{1}{1+1+1} = 0,33$ | $\frac{1}{1+1+1} = 0,33$ | $\frac{1}{1+1+1} = 0,33$ |
| V3 | $\frac{1}{1+1+1} = 0,33$ | $\frac{1}{1+1+1} = 0,33$ | $\frac{1}{1+1+1} = 0,33$ |

Prioridades médias locais para IDA, equação (50).

$$PML_{IDA} = \left(\frac{0,33 + 0,33 + 0,33}{3} ; \frac{0,33 + 0,33 + 0,33}{3} ; \frac{0,33 + 0,33 + 0,33}{3} \right) \quad (50)$$

$$= (0,33 ; 0,33 ; 0,33)$$

Prioridades intermediárias para IDA, equação (51).

$$PI_{IDA} = (0,33 \times 0,5 ; 0,33 \times 0,5 ; 0,33 \times 0,5) = (0,17 ; 0,17 ; 0,17) \quad (51)$$

Tabela 41: Matriz normalizada para o subcritério GEN

| GEN | V1 | V2 | V3 |
|------------|---|-------------------------|-------------------------|
| V1 | $\frac{1}{1+\frac{1}{3}+\frac{1}{3}} = 0,6$ | $\frac{3}{3+1+1} = 0,6$ | $\frac{3}{3+1+1} = 0,6$ |
| V2 | $\frac{1/3}{1+\frac{1}{3}+\frac{1}{3}} = 0,2$ | $\frac{1}{3+1+1} = 0,2$ | $\frac{1}{3+1+1} = 0,2$ |
| V3 | $\frac{1/3}{1+\frac{1}{3}+\frac{1}{3}} = 0,2$ | $\frac{1}{3+1+1} = 0,2$ | $\frac{1}{3+1+1} = 0,2$ |

Prioridades médias locais para GEN, equação (52).

$$PML_{GEN} = \left(\frac{0,6 + 0,6 + 0,6}{3} ; \frac{0,2 + 0,2 + 0,2}{3} ; \frac{0,2 + 0,2 + 0,2}{3} \right) \\ = (0,6 ; 0,2 ; 0,2) \quad (52)$$

Prioridades intermediárias para GEN, equação (53).

$$PI_{GEN} = (0,6 \times 0,5 ; 0,2 \times 0,5 ; 0,2 \times 0,5) = (0,3 ; 0,1 ; 0,1) \quad (53)$$

Tabela 42: Matriz normalizada para o subcritério GES

| GES | V1 | V2 | V3 |
|------------|---|-----------------------------|-----------------------------|
| V1 | $\frac{1}{1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}} = 0,6$ | $\frac{3}{3 + 1 + 1} = 0,6$ | $\frac{3}{3 + 1 + 1} = 0,6$ |
| V2 | $\frac{1/3}{1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}} = 0,2$ | $\frac{1}{3 + 1 + 1} = 0,2$ | $\frac{1}{3 + 1 + 1} = 0,2$ |
| V3 | $\frac{1/3}{1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}} = 0,2$ | $\frac{1}{3 + 1 + 1} = 0,2$ | $\frac{1}{3 + 1 + 1} = 0,2$ |

Prioridades médias locais para GES, equação (54).

$$PML_{GES} = \left(\frac{0,6 + 0,6 + 0,6}{3} ; \frac{0,2 + 0,2 + 0,2}{3} ; \frac{0,2 + 0,2 + 0,2}{3} \right) \\ = (0,6 ; 0,2 ; 0,2) \quad (54)$$

Prioridades intermediárias para GES, equação (55).

$$PI_{GES} = (0,6 \times 0,25 ; 0,2 \times 0,25 ; 0,2 \times 0,25) = (0,15 ; 0,05 ; 0,05) \quad (55)$$

Tabela 43: Matriz normalizada para o subcritério GDA

| GDA | V1 | V2 | V3 |
|------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| V1 | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ |
| V2 | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ |
| V3 | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ | $\frac{1}{1 + 1 + 1} = 0,33$ |

Prioridades médias locais para GDA, equação (56).

$$PML_{GDA} = \left(\frac{0,33 + 0,33 + 0,33}{3} ; \frac{0,33 + 0,33 + 0,33}{3} ; \frac{0,33 + 0,33 + 0,33}{3} \right) \\ = (0,33 ; 0,33 ; 0,33) \quad (56)$$

Prioridades intermediárias para GDA, equação (57).

$$PI_{GDA} = (0,33 \times 0,25 ; 0,33 \times 0,25 ; 0,33 \times 0,25) = (0,08 ; 0,08 ; 0,08) \quad (57)$$

Tabela 44: Matriz normalizada para o subcritério VAT

| VAT | V1 | V2 | V3 |
|-----|--------------------------|--------------------------------------|--|
| V1 | $\frac{1}{1+5+7} = 0,08$ | $\frac{1/5}{\frac{1}{5}+1+3} = 0,05$ | $\frac{1/7}{\frac{1}{7}+\frac{1}{3}+1} = 0,1$ |
| V2 | $\frac{5}{1+5+7} = 0,38$ | $\frac{1}{\frac{1}{5}+1+3} = 0,24$ | $\frac{1/3}{\frac{1}{7}+\frac{1}{3}+1} = 0,23$ |
| V3 | $\frac{7}{1+5+7} = 0,54$ | $\frac{3}{\frac{1}{5}+1+3} = 0,71$ | $\frac{1}{\frac{1}{7}+\frac{1}{3}+1} = 0,68$ |

Prioridades médias locais para VAT, equação (58).

$$PML_{VAT} = \left(\frac{0,08 + 0,05 + 0,1}{3} ; \frac{0,38 + 0,24 + 0,23}{3} ; \frac{0,54 + 0,71 + 0,68}{3} \right) \\ = (0,08 ; 0,28 ; 0,64) \quad (58)$$

Prioridades intermediárias para VAT, equação (59).

$$PI_{VAT} = (0,08 \times 0,8 ; 0,28 \times 0,8 ; 0,64 \times 0,8) = (0,06 ; 0,22 ; 0,51) \quad (59)$$

Tabela 45: Matriz normalizada para o subcritério FDF

| FDF | V1 | V2 | V3 |
|-----|--------------------------|--------------------------------------|--|
| V1 | $\frac{1}{1+5+7} = 0,08$ | $\frac{1/5}{\frac{1}{5}+1+3} = 0,05$ | $\frac{1/7}{\frac{1}{7}+\frac{1}{3}+1} = 0,1$ |
| V2 | $\frac{5}{1+5+7} = 0,38$ | $\frac{1}{\frac{1}{5}+1+3} = 0,24$ | $\frac{1/3}{\frac{1}{7}+\frac{1}{3}+1} = 0,23$ |
| V3 | $\frac{7}{1+5+7} = 0,54$ | $\frac{3}{\frac{1}{5}+1+3} = 0,71$ | $\frac{1}{\frac{1}{7}+\frac{1}{3}+1} = 0,68$ |

Prioridades médias locais para FDF, equação (60).

$$\begin{aligned} PML_{FDF} &= \left(\frac{0,08 + 0,05 + 0,1}{3} ; \frac{0,38 + 0,24 + 0,23}{3} ; \frac{0,54 + 0,71 + 0,68}{3} \right) \\ &= (0,08 ; 0,28 ; 0,64) \end{aligned} \quad (60)$$

Prioridades intermediárias para FDF, equação (61).

$$PI_{FDF} = (0,08 \times 0,2 ; 0,28 \times 0,2 ; 0,64 \times 0,2) = (0,02 ; 0,06 ; 0,13) \quad (61)$$