EDUARDO HAUY JUNIOR

PROPOSTA DE MODELO MULTICRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE INVESTIMENTOS EM REFINARIAS DE PETRÓLEO NO BRASIL

SÃO PAULO
2015

EDUARDO HAUY JUNIOR

PROPOSTA DE MODELO MULTICRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE INVESTIMENTOS EM REFINARIAS DE PETRÓLEO NO BRASIL

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

SÃO PAULO
2015

EDUARDO HAUY JUNIOR

PROPOSTA DE MODELO MULTICRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE INVESTIMENTOS EM REFINARIAS DE PETRÓLEO NO BRASIL

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Pacheco da Costa

SÃO PAULO
2015

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador.

São Paulo,_____de _____ de 2015

Assinatura do autor:_____

Assinatura do orientador:_____

Catalogação-na-publicação

Hauy Junior, Eduardo
Proposta de modelo multicritérios para análise de investimentos em refinarias de petróleo no Brasil / E. Hauy Junior. – versão corr. – São Paulo, 2015.
121 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.Investimentos (Análise) 2.Engenharia econômica 3.Tomada de decisão 4.Petróleo (Refino) 5.Lógica Fuzzy I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de fazer um agradecimento mais do que especial ao amigo Prof. Dr. Reinaldo Pacheco da Costa por seu companheirismo e sua orientação precisa e segura ao longo da jornada que culminou com a elaboração deste trabalho. Também não posso deixar de mencionar o Prof. Dr. Renato de Castro Garcia, responsável por ter aberto as portas do Departamento de Engenharia de Produção para mim.

Agradeço aos engenheiros Carlos Alberto Violatti Junior, Edimilson Fernandes, José Ricardo Miranda Silveira, Gilmar Michel Queiroz, Thiago Borin Sicchieri e Cláudia Chaves Xavier, meus superiores imediatos ao longo do período em que este trabalho foi elaborado, que disponibilizaram um tempo valioso para que eu pudesse desenvolvê-lo.

Em especial agradeço ao engenheiro Marcelo Crescenti Aulicino, meu predecessor nesta jornada, que tanto me ajudou com suas dicas, recomendações e constante apoio.

Agradeço aos meus pais, Eduardo Hauy e Daisy de Almeida Talocchi Hauy e à minha esposa Tatiana Catalan Govêa Hauy pelo incentivo incondicional desde o surgimento da primeira ideia até o momento em que a última palavra foi escrita.

Antecipadamente me desculpo se involuntariamente me esqueci de mencionar alguém. Se por um lado corro o risco de me tornar injusto, por outro, sinto-me na obrigação de fazer a devida referência àqueles que tiveram um papel fundamental para que este trabalho pudesse ter sido desenvolvido.

RESUMO

O processo de tomada de decisão que envolve a priorização e a seleção de projetos de investimentos na indústria do petróleo está longe de ser uma tarefa trivial. Ao mesmo tempo em que a empresa deve buscar relações favoráveis entre risco e retorno econômico-financeiro também deve se alinhar cada vez mais aos princípios do desenvolvimento sustentável em seus negócios. Em se tratando do caso da indústria petrolífera brasileira, formada essencialmente por um monopólio estatal, esta tarefa se torna ainda mais difícil, já que uma série de interesses públicos relacionados ao investimento também devem ser considerados. Sendo assim, o objetivo principal desta pesquisa foi o desenvolvimento e a aplicação de um modelo original de análise usando múltiplos critérios que auxiliasse na priorização e na seleção de projetos de investimentos nas refinarias de petróleo brasileiras. Utilizou-se uma metodologia de pesquisa quantitativa com o uso de diversos artefatos de matemática aplicada capazes de lidar adequadamente com as avaliações muitas vezes incompletas e subjetivas que caracterizam o problema da análise de investimentos em refinarias de petróleo.

Ao final do trabalho, conseguiu-se obter um modelo suficientemente simples, ao ponto de ser facilmente implementado em uma planilha eletrônica, robusto, ao ser capaz de lidar de maneira bastante adequada com as principais peculiaridades que envolvem o setor do refino de petróleo no Brasil e flexível, de maneira que os critérios de análise e as alternativas de decisão pudessem ser facilmente adicionados, removidos ou alterados de acordo com as necessidades específicas exigidas para cada caso.

Palavras Chave: Análise de Investimentos. Engenharia Econômica. Tomada de Decisão com Múltiplos Critérios. Refino de Petróleo. TOPSIS. Lógica Fuzzy.

ABSTRACT

The decision-making process involving the prioritization and selection of investment projects in the oil industry is far from being a trivial task. At the same time that the company must seek for a favorable relationship between risk and economic-financial return it must also be more and more aligned to the principles of sustainable development in their business. Regarding to the case of the Brazilian oil industry, essentially formed by a state monopoly, this task becomes even more difficult, since a number of public interests related to investment should also be considered. Thus, the main objective of this research was the development and application of an original analysis model using multiple criteria that help in the prioritization and selection of investment projects on the Brazilian oil refineries. We used a quantitative research methodology using various applied mathematical tools capable of dealing properly with often incomplete and subjective valuations of investment analysis in oil refineries.

At the end, it was possible to obtain a sufficiently simple model, that could be easily implemented in a spreadsheet, robust, to deal in a properly way with the main peculiarities involving the oil refining sector in Brazil and sufficiently flexible so that the criteria for analysis and decision alternatives could be easily added, removed or modified in accordance with the specific needs required for each case.

Key Words: Investment Analysis. Economic Engineering. Multiple Criteria Decision Making. Oil Refining. TOPSIS. Fuzzy Logic.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de informações de um problema literal de decisão composto por “n” alternativas de decisão e “m” critérios de avaliação. 58

Tabela 2 - Tabela de informações para o problema da priorização envolvendo alternativas de investimentos. 73

Tabela 3 – Tabela de conversão das variáveis linguísticas utilizadas para ponderação dos critérios de decisão em números fuzzy triangulares. Adaptado de Chen (2000). 75

Tabela 4 – Tabela de conversão das variáveis linguísticas utilizadas para avaliação das alternativas de decisão em números fuzzy triangulares. Adaptado de Chen (2000). 75

Tabela 5 – Tabela dos projetos de investimentos em avaliação pelo grupo gestor da refinaria. 93

Tabela 6 - Indicadores econômicos e financeiros dos projetos submetidos para análise. 94

Tabela 7 – Avaliação da importância relativa dos critérios de avaliação dos projetos feita pelos avaliadores do comitê. 95

Tabela 8 – Avaliação das propostas de projetos de investimentos feitas respectivamente pelos avaliadores 1, 2 e 3. 97

Tabela 9 - Cálculo do coeficiente de proximidade (CC) , do ranking final de cada alternativa de decisão e da carteira ótima de investimentos. 98

Tabela 10 – Cálculo da carteira de investimentos pelo método da taxa interna de retorno. 100

Tabela 11 - Média das avaliações de cada proposta de projeto e da importância de cada critério de análise convertidos para números fuzzy. 111

Tabela 12 - Matriz de decisão fuzzy normalizada. 113

Tabela 13- Matriz de decisão fuzzy normalizada e ponderada. 115

Tabela 14 - Cálculo da distância existente entre cada alternativa de decisão e a solução positiva ideal (FPIS). 117

Tabela 15 - Cálculo da distância existente entre cada alternativa de decisão e a solução negativa ideal (FNIS). 119

Tabela 16 - Cálculo do coeficiente de proximidade (CC) e do ranking final de cada alternativa de decisão. 121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia de estudo bibliométrico sobre a Tomada de Decisão Envolvendo Múltiplos Critérios na análise de investimentos. 14

Figura 2 – Evolução do número de publicações relacionadas ao tema da Tomada de Decisão envolvendo Múltiplos Critérios ao longo dos últimos 20 anos. 15

Figura 3 – Número de publicações por autor sobre o tema da Tomada de Decisão envolvendo Múltiplos Critérios ao longo dos últimos 20 anos. 16

Figura 4 – Principais periódicos relacionados ao tema da Tomada de Decisão envolvendo Múltiplos Critérios.....17

Figura 5 – Publicações por país relacionadas ao tema da Tomada de Decisão envolvendo Múltiplos Critérios.....17

Figura 6 – Configuração básica de um sistema de produção de produtos conjuntos. 20

Figura 7 – Diagrama esquemático da apuração econômica de um sistema de produção de produtos conjuntos. 21

Figura 8 – Processo de tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios. 39

Figura 9 – Funções de pertinência para cinco níveis de variáveis linguísticas.....52

Figura 10 – Número fuzzy “n” com dois “α-cuts”, “α1” e “α2”. 53

Figura 11 – Número fuzzy “n”. 54

Figura 12 – Número fuzzy triangular “n”. 56

Figura 13 – Visão sistemática do processo de elaboração de um modelo quantitativo. 66

Figura 14 - Árvore de ramificação (branch) e poda (bound) de um algoritmo branch and bound típico. 80

Figura 15 - Fluxograma do algoritmo implementado para seleção de projetos de investimentos. 82

Figura 16 - Fluxograma simplificado do processo produtivo da refinaria estudada...86

SUMÁRIO

1. Introdução 10

2. Fundamentação Teórica 12

2.1. Análise Bibliométrica 13

2.2. Contabilidade de Custos e Engenharia Econômica 18

2.2.1. O Modelo Econômico de Processos com Produção de Produtos Conjuntos..... 19

2.2.2. Engenharia Econômica..... 23

2.2.3. Limitações da Engenharia Econômica..... 34

2.3. Ferramentas para Tomada de Decisão envolvendo Múltiplos Critérios37

2.3.1. Modelos de Mensuração de Valor 42

2.3.2. Modelos Direcionados por Metas, Aspirações e Níveis de Referência..... 45

2.3.3. Modelos de Sobreclassificação 47

2.3.4. Lógica Fuzzy..... 50

2.3.5. A metodologia Fuzzy TOPSIS 57

2.4. O Problema da Mochila..... 62

3. Metodologia de Pesquisa 65

4. Proposta de Modelo de Análise..... 69

4.1. Identificação e Estruturação do Problema de Decisão..... 70

4.2. Elaboração do Modelo 74

4.2.1. Priorização dos Projetos de Investimentos..... 74

4.2.2. Seleção dos Projetos de Investimentos..... 79

4.3. Aplicação do Modelo Teórico em um Caso Prático..... 84

4.3.1. Descrição do Processo Produtivo da Refinaria 84

4.3.2. Descrição da Estrutura Organizacional da Refinaria 88

4.3.3. Aplicação do Modelo 91

5. Considerações Finais 101
6. Referências Bibliográficas 104
7. Apêndice A – Tabelas Complementares 110

1. Introdução

O processo de tomada de decisão envolvendo a priorização e a seleção de projetos de investimentos na indústria do petróleo é uma tarefa complexa.

Ao mesmo tempo em que se deve buscar a seleção daqueles projetos cujas relações entre risco e retorno econômico-financeiro sejam as mais favoráveis possíveis, a indústria petrolífera também vem se preocupando em mudar uma imagem desgastada por décadas na liderança da emissão de gases que contribuem para o aquecimento global, adotando uma postura cada vez mais alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável, investindo em fontes de energia renovável, estabelecendo metas de redução na emissão destes gases e melhorando a qualidade dos combustíveis comercializados.

Em se tratando mais especificamente do caso da indústria petrolífera brasileira esta tarefa se torna ainda mais complexa. Segundo levantamento estatístico da Agência Nacional do Petróleo - ANP (2013), durante o ano de 2012 a Petrobras foi responsável direta pela produção de 92% do petróleo produzido em território brasileiro. No que se refere à capacidade de refino, o domínio da empresa sobre a atividade é ainda maior. Suas refinarias respondem por 98% da capacidade total de processamento de petróleo no Brasil; ou seja, embora o regime de monopólio da atividade petrolífera brasileira tenha sido oficialmente extinto em 1997, na prática ele permanece. E sendo a Petrobras uma empresa de capital predominantemente estatal, não pode deixar de considerar uma série de interesses públicos, como a necessidade de garantir o abastecimento do país por petróleo e seus derivados, a geração de empregos, o crescimento e o desenvolvimento da indústria nacional e a ampliação da receita tributária dirigida para programas sociais.

Neste cenário, em que se exige a ponderação de objetivos tão diversos e muitas vezes conflitantes entre si, a priorização e a seleção de uma carteira de projetos de investimentos é tarefa extremamente difícil. O conjunto de ferramentas tradicionais de análise de investimentos - objeto de estudo da Engenharia Econômica - lida apenas com as grandezas econômicas relacionadas ao investimento, desconsiderando aspectos legais, políticos, estratégicos, sociais e ambientais muitas vezes colocados de maneira qualitativa e intangível.

Sendo assim, o objetivo principal desta pesquisa foi o desenvolvimento de um modelo de análise multicritérios que auxiliasse na priorização e na seleção de projetos de investimentos nas refinarias de petróleo brasileiras, complementando as ferramentas clássicas de análise de investimentos da Engenharia Econômica e capturando as particularidades de um setor tão vital para a economia nacional.

O motivo que inspirou este trabalho a estudar exclusivamente a área do refino é que, embora existam estudos publicados relacionados à análise de projetos de investimentos na indústria do petróleo, dificilmente o tema do refino é abordado. A maior parte se dedica a estudar problemas associados à exploração e produção.

2. Fundamentação Teórica

Esta seção está dividida em quatro partes. A primeira parte traz uma análise bibliométrica da literatura acadêmica sobre o tema da tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios e análise de investimentos, cuja elaboração teve dois objetivos principais. O primeiro objetivo foi o de verificar o perfil e a relevância das publicações associadas ao tema, buscando-se mapear sua evolução ao longo dos anos, bem como identificar os autores mais produtivos, os países onde elas se concentram e em quais periódicos elas são veiculadas. O segundo objetivo foi o de confirmar a hipótese da existência de uma lacuna teórica no que se refere à aplicação de ferramentas de tomada de decisão com múltiplos critérios na análise de investimentos voltados para a indústria do petróleo, mais especificamente para a área do refino.

A segunda parte aborda os princípios conceitos, métodos e limitações da Contabilidade de Custos aplicada ao setor de refino de petróleo e das ferramentas clássicas de análise de investimentos, escopo da Engenharia Econômica.

A terceira parte estuda de maneira mais aprofundada as ferramentas disponíveis na literatura técnica para a análise de problemas de tomada de decisão que envolvam múltiplos critérios, procurando superar, de certa forma, parte das limitações impostas pelas ferramentas tradicionais de análise da Engenharia Econômica.

Por fim, a quarta parte aborda o problema de otimização combinatória conhecido na literatura como problema da mochila, cujo objetivo é preencher uma ou mais mochilas com um determinado conjunto de objetos, de diferentes pesos e valores, de maneira que se tenha no interior da mochila o maior valor possível, respeitando-se o limite máximo de peso suportado. A ideia é apresentar os principais conceitos e abordagens que se aplicam diretamente ao problema da seleção de uma carteira de projetos de investimentos.

2.1. Análise Bibliométrica

Tague-Sutcliffe (1992) e Araújo (2006) definem a bibliometria, ou análise bibliométrica, como sendo o estudo dos aspectos quantitativos da produção, disseminação e uso da informação registrada, consistindo na aplicação de técnicas estatísticas e matemáticas para descrever aspectos da literatura e de outros meios de comunicação.

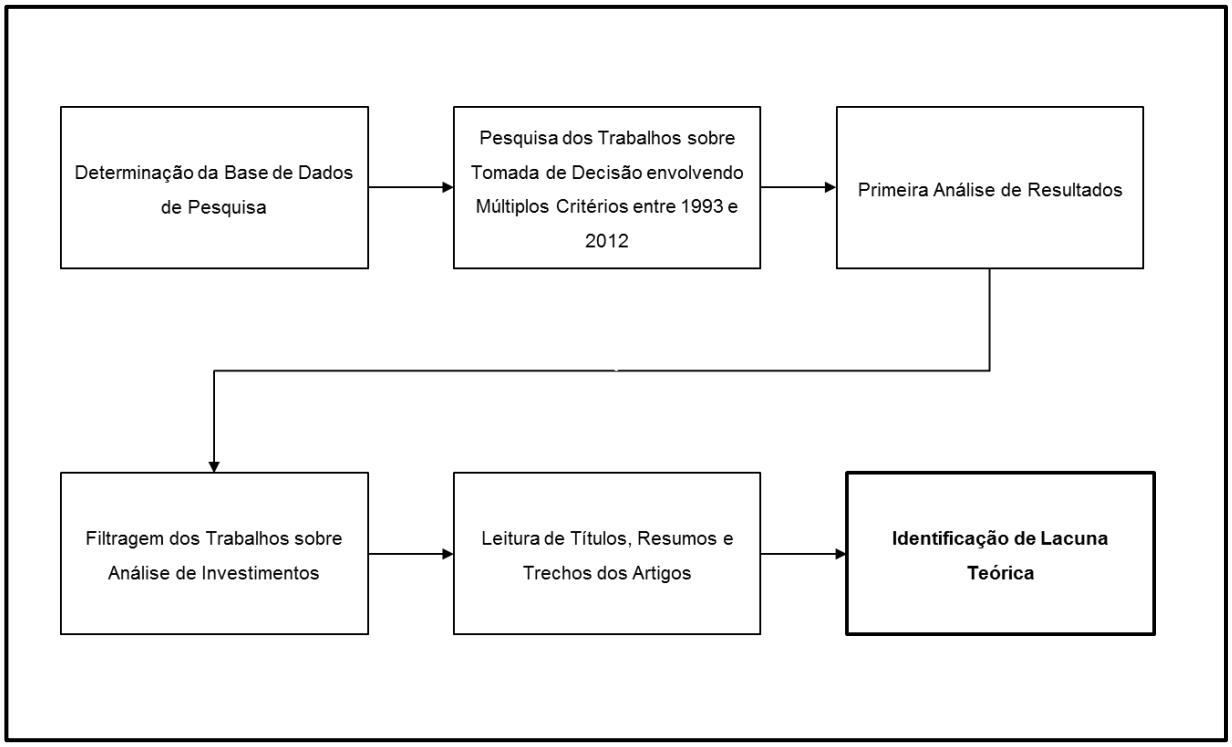
A bibliometria se diferencia da análise bibliográfica tradicional, uma vez que prioriza a utilização de métodos quantitativos ao invés de métodos discursivos. (NICHOLAS; RITCHIE,1978)

Para Macias-Chapula (1998), no entanto, uma das principais limitações no uso da bibliometria para mapear a pesquisa científica de um país está na cobertura das bases de dados oferecidas. Poucas bases incluem livros, capítulos de livros e teses, e a maioria não incorpora a assim chamada literatura cinzenta (relatórios técnicos, conferências, notas técnicas etc.).

Tentando contornar (pelo menos de maneira parcial) esta limitação, optou-se por utilizar uma base de dados ampla e representativa no meio acadêmico, que permite acesso aos trabalhos publicados nos mais conceituados periódicos internacionais. A base de dados escolhida foi a Web of Knowledge, atualizada com periodicidade semanal e fornecida pelo Institute for Scientific Information (ISI).

A pesquisa foi realizada na data de 23/07/2013 e foram buscados inicialmente os artigos acadêmicos publicados entre 1993 e 2012 que apresentassem em seus tópicos os termos “Multple Criteria Decision Making” ou “Multiple Criteria Decision Aid”. Foram excluídos desta pesquisa inicial os capítulos de livros, dissertações, teses e trabalhos apresentados em congresso. A figura 1 resume a metodologia empregada nesta etapa do trabalho.

Figura 1 – Metodologia de estudo bibliométrico sobre a Tomada de Decisão Envolvendo Múltiplos Critérios na análise de investimentos.



Fonte: Autor

Tentando-se obter de uma maneira preliminar os resultados que pudessem trazer alguma eventual contribuição ao trabalho proposto foram filtrados os registros que se enquadravam nas seguintes categorias:

- *Operations Research Management*

- *Management*

- *Engineering Industrial*

- *Economics*

- *Engineering Manufacturing*

- *Business*

- *Engineering Multidisciplinary*

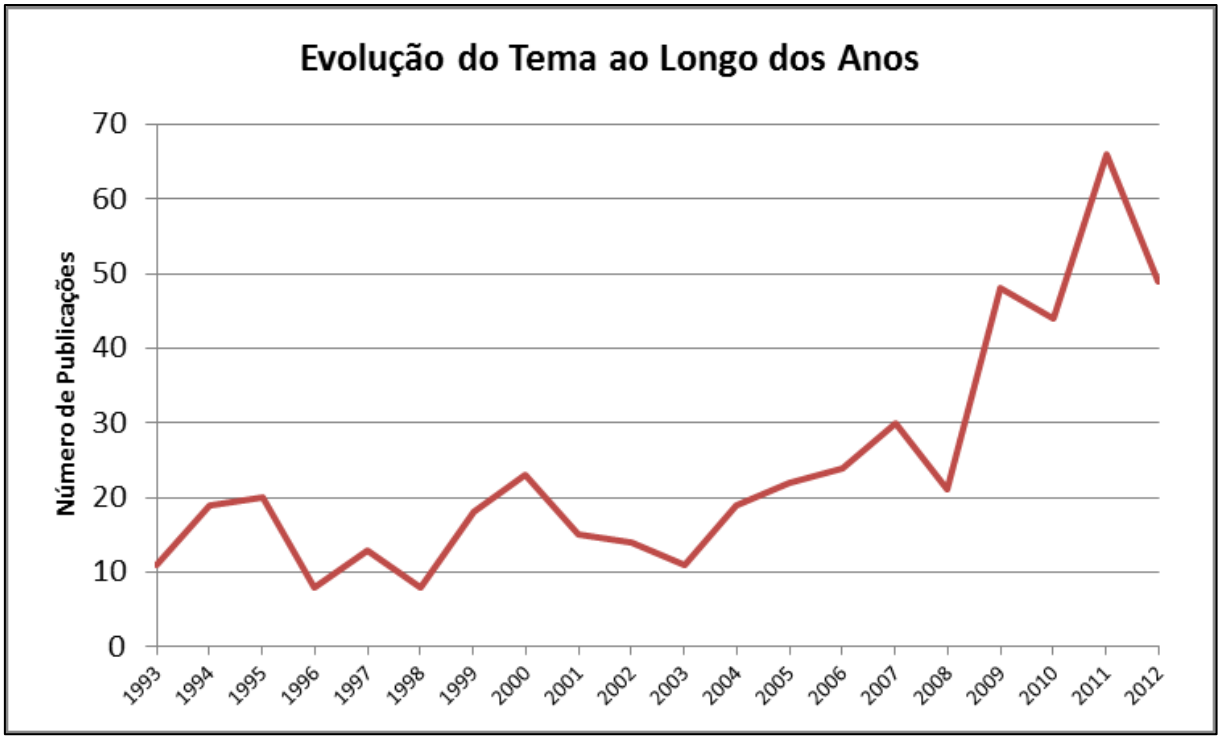
- *Energy Fuels*

Esta primeira busca retornou um total de 561 trabalhos, distribuídos ao longo do tempo de acordo com a curva apresentada na figura 2. Esta figura nos mostra que o

tema vem apresentando um número relativamente expressivo e crescente de publicações ao longo dos anos, evidenciando que a geração de conhecimento associada ao tema é relevante para meio acadêmico. O aspecto ascendente da curva nos dá indícios de que o assunto além de ser relevante, também é atual.

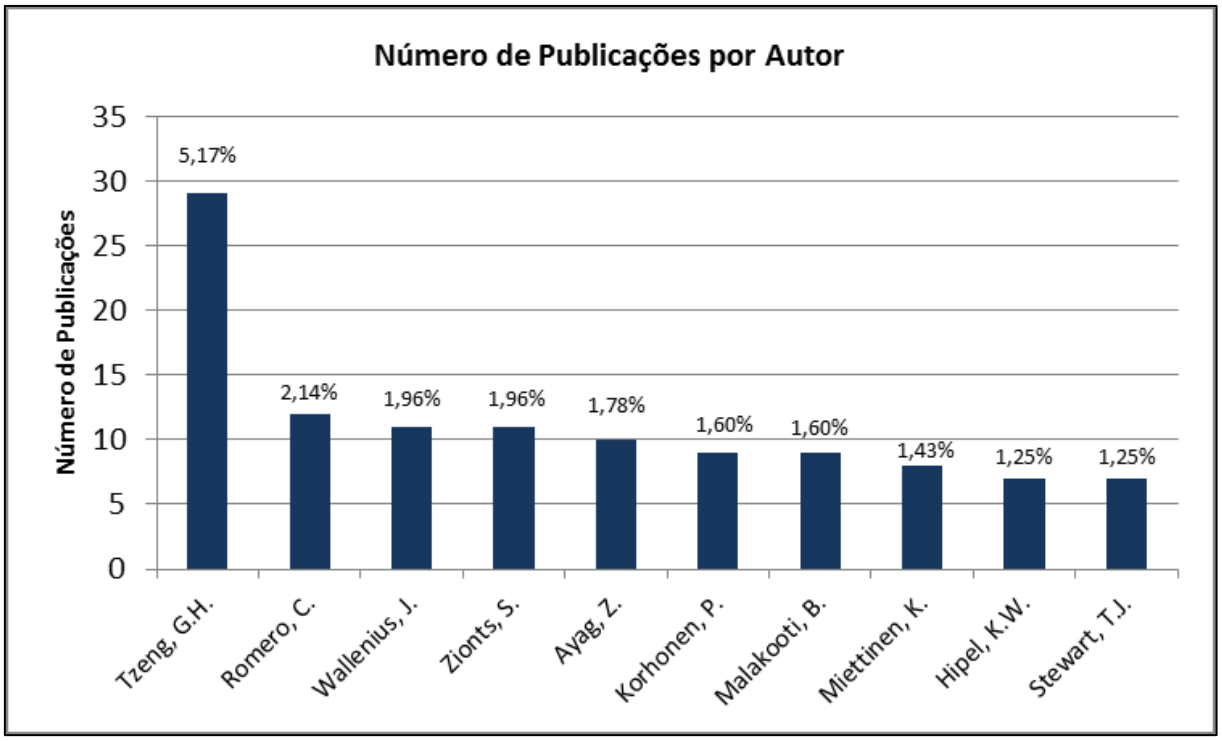
A figura 3 indica os principais autores que publicam sobre o tema.

Figura 2 – Evolução do número de publicações relacionadas ao tema da Tomada de Decisão envolvendo Múltiplos Critérios ao longo dos últimos 20 anos.



Fonte: Autor

Figura 3 – Número de publicações por autor sobre o tema da Tomada de Decisão envolvendo Múltiplos Critérios ao longo dos últimos 20 anos.

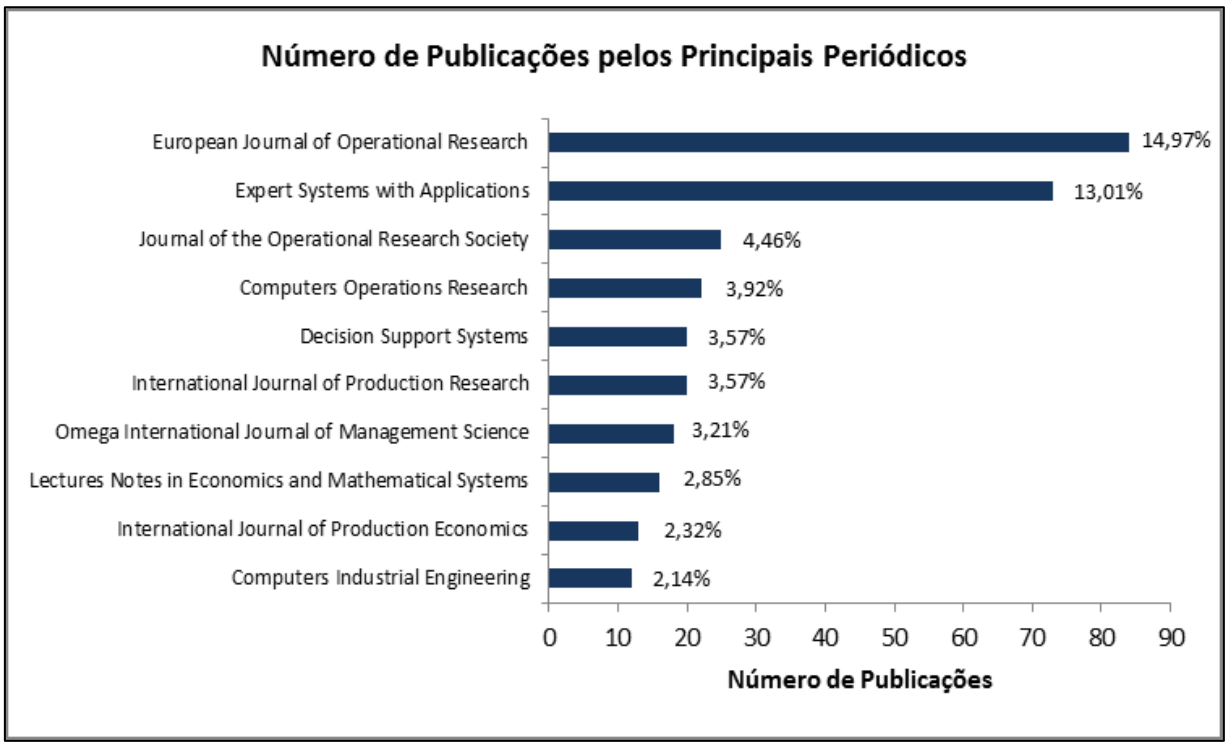


Fonte: Autor

As figuras 4 e 5 mostram os periódicos onde os principais trabalhos relativos ao tema são publicados e seus países de origem respectivamente. É interessante notar a concentração que existe neste quesito. Os dois principais periódicos que abordam o tema foram responsáveis pela publicação de quase 30% do total de artigos acadêmicos na área ao longo dos últimos vinte anos.

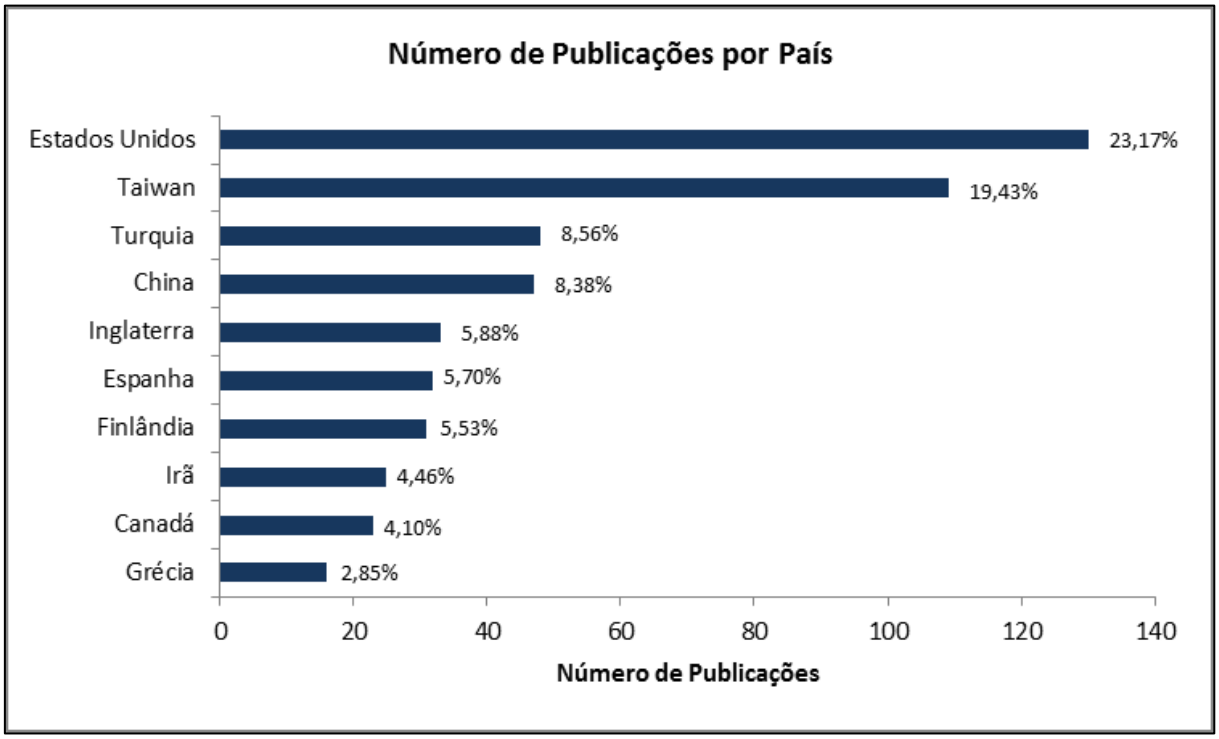
Em relação à figura 5, percebe-se que o maior número de publicações sobre o tema ocorre nas universidades norte-americanas, sendo estas responsáveis por aproximadamente 25% do número total de publicações. Chama a atenção também o expressivo número de publicações oriundas de países asiáticos como China e Taiwan. Somados, estes dois países já são responsáveis por quase 30% da produção literária mundial sobre o assunto.

Figura 4 – Principais periódicos relacionados ao tema da Tomada de Decisão envolvendo Múltiplos Critérios.



Fonte: Autor

Figura 5 – Publicações por país relacionadas ao tema da Tomada de Decisão envolvendo Múltiplos Critérios.



Fonte: Autor

Dos resultados obtidos na etapa anterior, foram filtrados todos os registros em que houve a ocorrência da palavra “investment” nos temas dos trabalhos.

Esta segunda pesquisa retornou apenas 26 resultados. Destes, nenhum apresentava como tema central o estudo da aplicação de técnicas multicritérios de tomada de decisão em investimentos industriais. A leitura dos títulos, resumos e eventualmente de alguns trechos de cada trabalho indicaram que a maior parte aborda a análise de investimentos em ativos financeiros, confirmando a hipótese inicial de que há uma lacuna teórica relacionada à análise multicritérios de projetos de investimentos no setor do refino de petróleo à qual este trabalho pretende preencher.

2.2. Contabilidade de Custos e Engenharia Econômica

A contabilidade de custos, mais especificamente a área da contabilidade gerencial reúne o conjunto de informações necessárias para a administração da empresa, que complementam as informações normalmente disponibilizadas pela contabilidade financeira tradicional.

Por sua vez, a Engenharia Econômica é a área do conhecimento que possui o conjunto das ferramentas necessárias que permite a comparação dos aspectos econômicos envolvidos entre diversas alternativas de investimento. (TORRES, 2006)

Aplicadas em conjunto, tanto a Contabilidade de Custos quanto a Engenharia Econômica fornecem o arcabouço mais difundido e utilizado no meio empresarial nos processos envolvendo tomadas de decisão de cunho econômico, como a introdução ou o corte de um determinado produto, a opção pela compra ou pela produção de um determinado bem ou serviço ou para a análise da viabilidade econômica de novos projetos de investimentos.

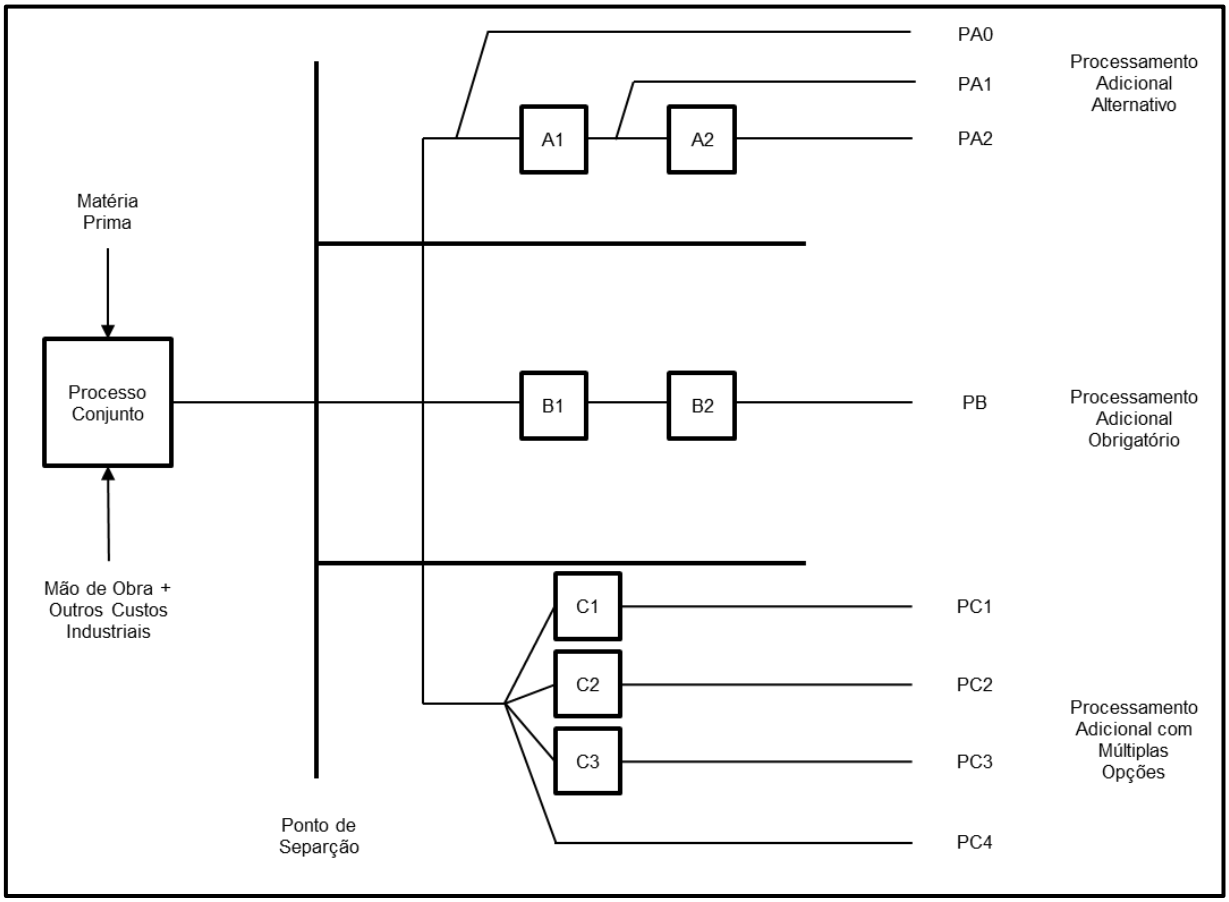
A primeira parte desta seção aborda a contabilidade de custos aplicada ao setor do refino de petróleo, mais especificamente, o Modelo Econômico de Processos com Produção de Produtos Conjuntos. A segunda parte, por sua vez, aborda os princípios conceitos, métodos e limitações das ferramentas clássicas de análise de investimentos, escopo da Engenharia Econômica.

2.2.1. O Modelo Econômico de Processos com Produção de Produtos Conjuntos

Quando se estuda de maneira mais detalhada o fenômeno da apropriação dos custos e despesas industriais envolvidos no processo produtivo em refinarias de petróleo, percebe-se uma particularidade em comparação a outros segmentos da indústria. Todos os produtos gerados neste processo são oriundos de uma mesma matéria prima, o petróleo.

Neste tipo de situação, Brunstein (2005) sugere que a apropriação dos custos dos produtos para fins gerenciais seja feita através do Modelo Econômico de Processos com Produção de Produtos Conjuntos. Segundo o autor, o Modelo Econômico de Processos com Produção de Produtos Conjuntos foi desenvolvido exatamente para lidar com processos produtivos semelhantes aos que ocorrem em uma refinaria de petróleo, em que os produtos são gerados a partir de uma mesma matéria prima. Posteriormente, estes produtos podem ser submetidos a processamentos adicionais (alternativos, obrigatórios ou com múltiplas opções). A figura 6 abaixo ilustra a configuração genérica de um sistema de produção de produtos conjuntos.

Figura 6 – Configuração básica de um sistema de produção de produtos conjuntos.



Fonte: Brunstein e Tomiya (1995)

Essencialmente, os produtos oriundos de um sistema de produção conjunta podem ser classificados, segundo Martins (2003), em coprodutos, subprodutos ou sucatas.

Os coprodutos são os produtos principais produzidos pela empresa. São chamados de coprodutos pelo fato de serem oriundos de uma mesma matéria prima.

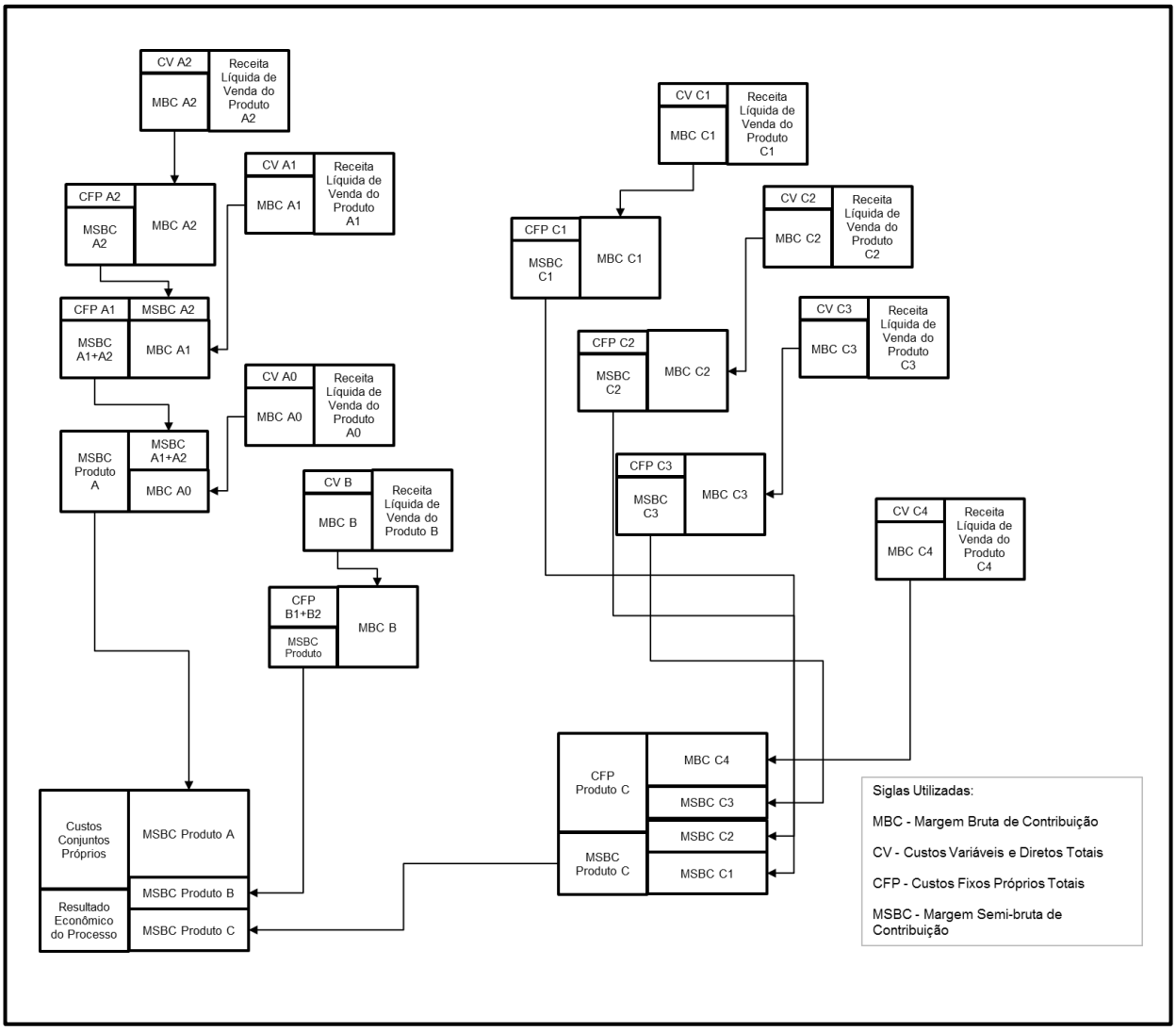
Os subprodutos são obtidos por meio do processo produtivo da mesma maneira que os coprodutos e possuem mercado de venda relativamente estável, porém representam uma parcela muito pequena do faturamento total da empresa (normalmente inferior a 10%), tendo seu valor líquido de realização considerado como uma redução de custo de elaboração dos produtos principais (coprodutos).

A terceira categoria de produtos produzidos em um sistema de produção conjunta é a sucata, diferenciada dos subprodutos, por um lado, por não apresentarem produção contínua e, por outro, por apresentarem valor de venda e mercado incertos. As sucatas não recebem custos e sua eventual receita, contabilmente, não

pode ser considerada como uma diminuição dos custos de produção, pois quando ocorre sua venda sua receita é contabilizada como “Outras Receitas Operacionais”.

A apuração econômica é feita por meio dos resultados individuais de cada coproduto, com base no modelo econômico de Brunstein e Tomiya (1995), representado esquematicamente na figura 7.

Figura 7 – Diagrama esquemático da apuração econômica de um sistema de produção de produtos conjuntos.



Fonte: Brunstein e Tomiya (1995)

As receitas líquidas de venda de cada produto são obtidas através da subtração das receitas brutas de venda pelas despesas proporcionais ao faturamento, também conhecidas como despesas de venda. Por sua vez, as margens brutas de

contribuição (MBC) são obtidas através da subtração das receitas líquidas de cada produto pelos seus custos variáveis (equação 1).

$$MBC = RL - CV \quad (1)$$

Os custos fixos próprios (CFP) são aqueles custos fixos que podem ser atribuídos apenas a alguns produtos, mas não a todos. É o caso, por exemplo, de um processamento adicional que somente alguns produtos utilizam, como custos fixos específicos de supervisão ou com setup de máquinas. Quando uma ou mais margem bruta de contribuição contribuem na cobertura de determinados custos fixos próprios, obtém-se uma margem semibruta de contribuição (MSBC). A equação 2 mostra como a margem semibruta de contribuição é gerada em um sistema de produção de produtos conjuntos.

$$MSBC = MBC - CFP \quad (2)$$

Eventualmente, algumas margens semibrutas de contribuição podem contribuir isoladamente ou em conjunto para a cobertura de alguns custos fixos próprios, conforme mostra a equação 3. A contribuição de outras margens brutas e semibrutas de contribuição são representadas respectivamente por MBC’ e MSBC’.

$$MSBC = MSBC' + MBC' - CFP \quad (3)$$

Finalmente, quando as contribuições econômicas cobrem todos os custos conjuntos totais, obtém-se o resultado operacional (RES) do sistema produtivo, conforme mostra a equação 4. A contribuição final das vendas diretas de coprodutos e dos resultados dos processos adicionais é tratada respectivamente por MBC” e MSBC”. A estrutura de custos fixos de um sistema de operações de processos de produção conjunta é representada pelos custos conjuntos totais (CCT), que são os valores totais de todos os custos e despesas que ocorrem antes do ponto de separação.

$$RES = MSBC" + MBC" - CCT \quad (4)$$

2.2.2. Engenharia Econômica

Enquanto a Engenharia tradicional se preocupa em analisar seus projetos sob o ponto de vista da viabilidade técnica, ou seja, se podem ou não serem realizados com procedimentos e equipamentos existentes, o foco da Engenharia Econômica está na análise da viabilidade econômica, de maneira que os projetos possam remunerar o investidor de maneira adequada.

A primeira etapa na análise econômica de um projeto de investimento é a determinação do incremento ao fluxo de caixa da empresa que o novo projeto em estudo trará, ou seja, a diferença entre o fluxo de caixa da empresa com o projeto e o fluxo de caixa da empresa sem o projeto.

A elaboração do fluxo de caixa parte inicialmente do demonstrativo ou demonstração do resultado do exercício (DRE), que é basicamente a demonstração contábil que mostra a formação do resultado líquido da empresa através da contabilização de receitas, custos e resultados apurados durante um determinado período de operação.

Porém, o resultado apresentado por uma empresa, não necessariamente reflete todas as mudanças ocorridas no seu caixa durante o período de análise. Para se chegar ao fluxo de caixa do projeto propriamente dito também devem ser consideradas aquelas entradas, saídas e variações no capital de giro que não constam no Demonstrativo do Resultado do Exercício.

Para Damodaran (2002), existem três etapas que devem ser seguidas para se determinar o fluxo de caixa final de uma empresa. A primeira é a estimativa dos lucros gerados por ela sobre os ativos e investimentos existentes. A segunda é estimar a parcela deste lucro que se destina aos impostos. Estas duas etapas são obtidas através da análise de Demonstrativo do Resultado do Exercício.

Finalmente, a terceira etapa é desenvolver uma medida de quanto a empresa está reinvestindo em crescimento futuro, determinando o quanto ela está reinvestindo em

ativos tangíveis e de longo prazo (despesas líquidas de capital) e ativos de curto prazo (capital de giro). Esses valores devem ser subtraídos do lucro líquido da empresa.

Além disso, deve-se somar o valor descontado na depreciação do ativo (já que não ocorre um desembolso efetivo desta quantia) e nos casos em que o fluxo de caixa conta com a participação de terceiros, deve-se somar os valores referentes à entrada de empréstimos, e subtrair as saídas referentes à amortização do principal. (GONÇALVES NETO; CALÔBA; MOTTA, 2009)

Vale lembrar que em Engenharia Econômica, os valores sempre são referidos a uma determinada data, ou seja, a simples informação do valor envolvido em uma transação não é suficiente. É necessário também que se informe o instante em que tais quantias são pagas ou recebidas.

A transposição destes valores no tempo é feita através da taxa de juros adotada.

Para Torres (2006) pode-se fazer uma analogia entre a matemática financeira e as operações com frações matemáticas. Da mesma forma que, para comparar frações ordinárias deve-se convertê-las a um mesmo denominador comum, a comparação de valores somente pode ser feita quando eles são referidos a uma data comum, isto é, atualizados.

Esta taxa, denominada taxa de atratividade, é fixada pelo investidor baseando-se em suas necessidades e expectativas a respeito do futuro, expressando a avaliação do investidor do valor temporal do dinheiro, incluindo uma margem para a cobertura de incertezas. Por exemplo, se o investidor tem maior necessidade de dinheiro no momento atual, apenas uma taxa de retorno alta faria com que ele abrisse mão de uma determinada quantia de dinheiro hoje para recebê-la no futuro. O mesmo raciocínio vale quando são considerados riscos e incertezas. Quando o investidor faz um investimento mais arriscado ou incerto, ele exige uma remuneração mais alta para compensar este risco, exigindo uma taxa de juros mais elevada.

O conceito de risco aparece intuitivamente devido à nossa percepção de uma incerteza futura, nossa incapacidade de saber o que nos reserva o futuro, em resposta a uma decisão tomada no presente. O risco implica a existência de mais de um resultado possível para uma dada ação. (MOTTA; CALÔBA, 2002)

Embora a obra de Brealey, Myers e Allen (2008) seja diretamente voltada ao mercado financeiro, seus principais conceitos relacionados ao risco podem ser extrapolados para os investimentos feitos em ativos reais.

Os autores explicam que a medida mais usual para caracterização da variação representada pelo risco é o valor do desvio padrão associado ao conjunto de todos os resultados possíveis para uma determinada ação. Além disso, o risco pode ser classificado em duas naturezas, o risco próprio, que é único para cada ativo e o risco de mercado, associado a variações do mercado como um todo.

A contribuição do risco de um ativo em um portfólio diversificado depende da sua sensibilidade às variações de mercado. Esta sensibilidade é conhecida como fator “beta”. O fator “beta” mede o risco não diversificável, medindo a variação de preço de um determinado ativo em relação a uma carteira de mercado perfeitamente diversificada.

Um ativo com fator “beta” igual a um possui um risco semelhante ao risco médio de mercado. Um ativo com um fator “beta” inferior a um, tem risco inferior à média do mercado enquanto que um ativo com fator “beta” maior do que um possui um risco associado a ela superior à média do mercado.

Como toda decisão de investimento está associada a uma decisão de financiamento, ou seja, se a empresa se utilizará do seu capital próprio ou de capital de terceiros para o desenvolvimento do projeto, é importante que se determine o custo deste capital utilizado para se chegar à taxa de atratividade.

A medida da relação existente entre o capital financiado por terceiros e o capital total necessário para a realização do investimento é conhecida como taxa de alavancagem financeira, já que normalmente o custo do capital de terceiros é inferior ao custo de capital próprio, alavancando a taxa de retorno esperada para o projeto.

Cabe-se salientar, no entanto que embora o efeito alavanca seja extremamente atraente quando tudo ocorre conforme o planejado ele envolve riscos mais elevados já que projetos de investimentos, por natureza, não são eventos perfeitamente determinísticos. (EHRLICH, 1989)

Outro conceito interessante utilizado para se determinar a taxa de desconto adequada para ser utilizada na avaliação de um projeto de investimento é o de custo

marginal de capital, abordado por Motta e Calôba (2002) e Gonçalves Neto, Calôba e Motta (2009).

O custo marginal de capital possui natureza mais dinâmica que o custo médio ponderado, focando no custo do capital necessário que está sendo levantado para uma oportunidade específica.

Mota e Calôba (2002) explicam que é essencial que o retorno de uma oportunidade seja sempre superior ao custo marginal do capital para essa oportunidade, já que a elevação desse custo marginal deverá, em tese, impedir que certos projetos sejam aprovados, à medida que a empresa tenderá a esgotar primeiramente os recursos mais baratos de captação.

2.2.2.1. Critérios para a Análise de Investimentos

Tradicionalmente, os critérios mais utilizados na avaliação econômica de investimentos são os chamados métodos baseados em fluxo de caixa descontado, como o Critério do Valor Presente Líquido (VPL), o Critério do Valor Futuro Líquido (VFL), o Critério do Benefício Uniforme Equivalente (BUE), o Tempo de Retorno do Investimento (TRI) e a Taxa Interna de Retorno (TIR).

O método do valor presente líquido consiste na transposição de uma série de entradas e saídas do fluxo de caixa projetado para o primeiro momento de ocorrência de fluxos financeiros, o instante zero, a uma taxa de juros arbitrada como taxa mínima de atratividade. (GONÇALVES NETO; CALÔBA; MOTTA, 2009)

O objetivo deste método é obter o valor criado ou destruído a partir do projeto, quando confrontado com a taxa mínima de atratividade arbitrada pelo investidor.

O valor presente líquido é obtido através da seguinte expressão:

$$VPL = \sum_{k=0}^{n} \frac{V_k}{(1+i)^k} \qquad (5)$$

Onde:

V_k corresponde ao saldo das entradas e saídas ocorridas em um determinado período “k”;

i corresponde à taxa de atratividade arbitrada pelo investidor;

k é um contador de tempo.

Resumidamente, o critério determina que quando um projeto apresenta valor presente líquido maior que zero, ele cobrirá o investimento inicial, a remuneração mínima exigida pelo investidor e ainda gerará um excedente. Ou seja, o projeto é dito viável do ponto de vista econômico.

O significado de um projeto com valor presente líquido negativo é de que há investimentos mais seguros e mais rentáveis no mercado, ou seja, o projeto é economicamente inviável.

O caso de valor presente líquido igual à zero significa que o investimento feito iguala a remuneração mínima requerida pelo investidor. Neste caso, do ponto de vista econômico, a opção pela execução ou não do projeto é indiferente.

O critério do valor futuro líquido é muito semelhante ao do valor presente líquido, diferenciando-se pelo fato de que no Valor Futuro Líquido, os fluxos são levados a valor futuro e não trazidos a valor presente.

Da mesma maneira, para que o projeto em análise possa ser considerado viável do ponto de vista econômico, seu valor futuro líquido deve ser maior do que zero para uma taxa de atratividade mínima arbitrada pelo investidor.

O valor futuro líquido pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$VFL = \sum_{k=0}^{n} V_k.(1+i)^{n-k} \qquad (6)$$

Onde:

V_k corresponde ao saldo das entradas e saídas ocorridas em um determinado período “k”;

i corresponde à taxa de atratividade arbitrada pelo investidor;

k é um contador de tempo.

O Beneficio Uniforme Equivalente (BUE), também conhecido na literatura da Engenharia Econômica como Custo Anual Equivalente, representa a série de pagamentos uniformes que seria equivalente ao fluxo de caixa em análise para um mesmo período de tempo. (TORRES, 2006)

Corresponde à transformação de um Valor Presente Líquido, ou uma série de fluxos irregulares, em uma série uniforme distribuída pelos períodos de ocorrência do fluxo. (GONÇALVES NETO; CALÔBA; MOTTA, 2009)

O uso do Benefício Uniforme Equivalente costuma ser denominado de custo anual equivalente quando se trata de questões ligadas à comparação de custos. Entretanto, nada impede que seja empregado como critério de rentabilidade também para análise de opções de investimentos, como por exemplo, em um investimento sobre o qual se retiram juros todos os meses, retendo-se apenas o principal.

Semelhantemente aos critérios anteriores, um projeto será dito economicamente viável toda a vez que o valor calculado para o Benefício Uniforme Equivalente for maior do que zero e economicamente inviável quando for menor.

O benefício uniforme equivalente, para uma taxa de atratividade i, pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$BUE = \frac{i}{(1+i)^n - 1} . \sum_{k=0}^{n} V_k . (1+i)^{n-k} \qquad (7)$$

Onde:

V_k corresponde ao saldo das entradas e saídas ocorridas em um determinado período “k”;

i corresponde à taxa de atratividade arbitrada pelo investidor;

k é um contador de tempo.

Algebricamente, a taxa interna de retorno (TIR) de um investimento é aquela que anula o valor presente líquido de um fluxo de caixa e, consequentemente, seu valor futuro líquido e seu benefício uniforme equivalente.

O cálculo da TIR a partir da fórmula do VPL do investimento é dado pela equação abaixo.

$$\sum_{k=0}^{n} \frac{V_k}{(1+TIR)^k} = 0 \qquad (8)$$

Onde:

V_k corresponde ao saldo das entradas e saídas ocorridas em um determinado período “k”;

TIR corresponde à taxa interna de retorno do investimento;

k é um contador de tempo.

Em termos econômicos, a taxa interna de retorno seria a taxa de remuneração do capital investido em um determinado projeto, o que pode ser, segundo Torres (2006), uma das razões de sua popularidade, já que pode ser calculada diretamente a partir do fluxo de caixa não precisando ser recalculada toda a vez que ocorre uma mudança na taxa de atratividade.

Cabe-se ressaltar, no entanto, que a utilização da TIR como critério de análise de investimentos demanda certos cuidados.

Sabe-se que o método da TIR apresenta soluções únicas para os investimentos chamados convencionais, ou seja, aqueles cujo fluxo de caixa apresenta valores inicialmente negativos (os investimentos propriamente ditos) e todos os demais restantes positivos ou nulos, de modo que só haja uma única variação de sinal durante todo o período de análise.

Em outros casos, a equação pode apresentar duas ou mais raízes como solução, tornando a análise do investimento equivocada, já que uma equação polinomial de ordem “n”, como é o caso da equação implícita que calcula a TIR, pode apresentar

até “n” raízes reais e positivas, sendo o número máximo de raízes igual ao número de vezes em que ocorre a troca de sinais dos coeficientes. Em outras palavras, o número máximo de raízes positivas será igual ao número de vezes, em que a sequência do fluxo de caixa muda de sinal durante o ciclo de vida do projeto. (TORRES, 2006)

Outro aspecto muito criticado em relação ao uso da TIR como ferramenta de análise de investimentos é que o seu cálculo parte da importante premissa de que a mesma taxa de juros vale tanto para os fluxos de caixa negativos quanto para os positivos. Ou seja, considera-se que tanto a taxa de reinvestimento para os resultados positivos auferidos quanto a taxa de financiamento que incide sobre os valores negativos são a mesma e equivalentes à taxa mínima de atratividade.

Embora o método do VPL também permita a manipulação dos fluxos intermediários na mesma taxa mínima de atratividade, esta taxa mínima é definida de acordo com a realidade do mercado, evitando grandes distorções no seu cálculo. Já a TIR é um parâmetro associado a um fluxo de caixa específico, representando uma medida precisa do retorno do investimento apenas quando inexistirem fluxos de caixa intermediários.

Sendo assim, nos casos em que o valor calculado para a TIR supera em demasia as taxas de financiamento e reinvestimento normalmente praticadas pelo mercado, a ideia de que a TIR representa a taxa de retorno do investimento não é verdadeira. (KASSAI, 1997)

Para Barbieri, Alvares e Machline (2007) a TIR só seria uma medida adequada de retorno do investimento nos chamados fluxos de caixa de dois pontos, em que todo o investimento ocorre na data inicial e todo o retorno é resgatado na data final. Embora este tipo de fluxo de caixa seja razoavelmente comum em certas aplicações financeiras, raramente ocorre em investimentos industriais.

Alguns autores ainda sugerem que seja utilizada a taxa interna de retorno modificada, que é aquela calculada quando se traz todos os fluxos de investimento para o momento inicial pela taxa de financiamento, se leva os fluxos positivos ao último instante pela taxa de reinvestimento e calcula-se a taxa que faz com que os dois fluxos sejam equivalentes.

Para Torres (2006) outra limitação no uso da TIR é a que ocorre quando o investidor compara projetos de investimentos com horizontes de tempo diferentes. Pelo fato de a TIR, ser um critério relativo, ela não classifica corretamente os projetos, ou seja, uma maior TIR não implica necessariamente que um projeto seja melhor do que outro, para uma dada taxa mínima de atratividade.

O critério do tempo de retorno do investimento (TRI) consiste em se determinar o instante em que a soma dos fluxos de caixa positivos iguala o valor do investimento feito para um projeto de investimento convencional, ou seja, a quantidade de períodos que se leva para recuperar o investimento feito. (GONÇALVES NETO; CALÔBA; MOTTA, 2009)

Alternativamente ao tempo de retorno do investimento, alguns autores sugerem o uso do tempo de retorno do investimento descontado, cujo conceito é similar.

Esse indicador, como sugere o nome, utiliza o fluxo de caixa descontado a uma taxa para ilustrar não o momento em que o fluxo de caixa chega a zero, mas o momento a partir do qual há resultado positivo e geração de valor em comparação com a taxa de desconto empregada.

Torres (2006) defende que, pela simplicidade dos cálculos, seu uso pode ser feito para uma triagem preliminar dos projetos ou para se eliminar projetos com tempo de retorno muito longos, mas que depois de selecionados, estes devem ser submetidos a critérios científicos mais rigorosos.

Para ele, pelo fato de este se tratar de um critério empírico, pois não leva em conta a atualização dos valores nem dos benefícios que o projeto pode produzir decorrido o prazo de retorno estabelecido, é ilusório tentar melhorá-lo usando valores atualizados a uma taxa de retorno, pois a maior objeção que se faz ao método é referente ao desprezo do restante do fluxo de caixa.

Alinhado ao raciocínio de Torres (2006), Brealey; Myers e Allen (2008) apresentam duas razões pelas quais a utilização do tempo de retorno do investimento como critério de decisão pode levar o investidor a tomar uma decisão equivocada.

A primeira delas é que o critério ignora todos os fluxos de caixa ocorridos após o período de corte determinado pelo investidor, correndo-se o risco de se eliminar projetos que eventualmente apresentem melhores indicadores econômicos.

A segunda razão é que a regra estabelece o mesmo peso para todos os fluxos de caixa anteriores à data de corte, ou seja, o valor do dinheiro não se altera com o tempo, violando um dos princípios fundamentais da Engenharia Econômica.

2.2.2.2. Métodos para Análise de Riscos

Quando se constrói o fluxo de caixa de um projeto, ou se arbitra uma taxa mínima de atratividade, normalmente os valores utilizados são baseados em estimativas, cheias de incerteza, de valores mais prováveis, que podem colocar em risco a viabilidade de um projeto. (TORRES, 2006)

Portanto, é de suma importância que o gestor tenha uma atitude pró ativa perante o risco, procurando agir de forma a mitigá-lo, eliminá-lo ou transferi-lo, sempre que isso for possível ou vantajoso.

Uma das ferramentas mais utilizadas no ambiente corporativo para a avaliação de riscos em projetos de investimentos é a análise de sensibilidade.

A análise da sensibilidade consiste em variar um ou mais fatores que influenciam o fluxo de caixa do projeto, mantendo os demais constantes, e calcular o impacto dessas variações nas variáveis de decisão do projeto. (TORRES, 2006)

Em geral, projetos que apresentam grandes variações no seu resultado a partir de pequenas alterações em uma determinada variável, apresentam risco mais alto.

Segundo Torres (2006), uma extensão da análise de sensibilidade, para contornar a dificuldade em variar mais de um fator de cada vez, é a construção de cenários. Cenário é um conjunto de valores das variáveis que modelam uma situação particular, que se desvia de um cenário de referência para cenários de comportamento em fronteira.

Rocha-Lima Junior; Monetti e Alencar (2011) denominam estes cenários desviados de “cenários estressados”. Os cenários estressados são desenhados exatamente com o intuito de compreender a intensidade dos riscos envolvidos no projeto, ou seja, o quanto uma variação nos custos de um empreendimento, ou dos preços de

venda, ou de inflação, ou de atrasos no cronograma afetam os indicadores nos quais o investidor se pautou para tomar suas decisões.

Quanto maior o desvio marcado nas fronteiras de estresse, mais agudos são os riscos. Muito estresse, resultando em pouco desvio, indica risco baixo. Pouco estresse, resultando em desvios agudos, representa risco alto.

Uma técnica muito utilizada nos dias de hoje, que se aproveita da facilidade de se resolver problemas complexos com o auxílio de recursos computacionais avançados, é a análise de Monte Carlo.

A análise de Monte Carlo, segundo Torres (2006), consiste em simular computacionalmente o projeto inúmeras vezes, criando cenários aleatórios que permitem obter uma distribuição estatística das variáveis de interesse.

O conjunto de resultados possíveis do problema possibilita calcular os valores médios, os desvios, os valores máximos e mínimos de variáveis do problema simulado. (SHIMIZU, 2001)

Outra técnica muito utilizada para auxiliar a tomada de decisão em ambientes de incerteza é a construção de uma árvore de decisão.

Segundo Torres (2006), árvores de decisão são diagramas que mostram as interações entre as decisões e os eventos aleatórios associados a elas, da maneira exata como são entendidos pelos tomadores de decisão.

São utilizadas normalmente para apresentar problemas que envolvem múltiplos objetivos, múltiplas variáveis e múltiplas etapas de decisão.

Os nós da árvore envolvendo decisões são tradicionalmente representados por um quadrado e os eventos aleatórios são representados por um círculo. A avaliação de cada alternativa é feita pelo valor monetário esperado (ou mais provável) para cada uma delas.

De acordo com Shimizu (2001), na árvore de decisão, cada alternativa de decisão forma o ramo de uma árvore, que contém os cenários possíveis, as probabilidades, as variáveis, os objetivos e o ganho final.

A árvore de decisão é o algoritmo mais simples e mais utilizado para tomadas de decisão envolvendo riscos e incertezas, estruturando as alternativas, as probabilidades e os cenários associados a cada uma delas de maneira clara e

objetiva. A grande desvantagem é que sua visualização começa a se tornar difícil na medida em que aumenta a complexidade e o tamanho do problema estudado.

2.2.3. Limitações da Engenharia Econômica

Uma situação que ocorre com muita frequência tanto na análise de projetos de investimentos em ativos reais quanto na análise de investimentos financeiros é quando o investidor se depara com alternativas de investimentos mutuamente excludentes e horizontes de análise diferentes.

Para se estabelecer uma base de comparação entre os investimentos, a Engenharia Econômica exige que todas as alternativas em estudo tenham o mesmo horizonte, fazendo com que o analista seja obrigado a se utilizar de simplificações nestes tipos de situação.

Como a atualização dos valores é feita por uma função do período (n) e da taxa de desconto (i), pode-se concluir que a única maneira de se garantir a confiabilidade da análise é exigir o mesmo período para todos os projetos, já que a taxa de desconto utilizada é a mesma.

Portanto, a comparação entre projetos com horizontes diferentes só pode ser feita através de uma extensão de prazo para os projetos mais curtos ou através do encurtamento do prazo para os projetos mais longos. Cada uma dessas considerações implica necessariamente em uma limitação na análise.

Torres (2006) argumenta que há apenas três tipos de simplificações a serem feitas nestes casos.

A primeira delas é através do modelo de atividade permanente ou repetitiva. Este modelo supõe que os projetos de investimento destinam-se a atender a uma atividade que continua além da vida útil do projeto, isto é, o horizonte do empreendimento é muito maior que o do projeto. Esta hipótese de repetição permite igualar os horizontes, tomando como horizonte comum o mínimo múltiplo comum dos horizontes de cada projeto, ou um de seus múltiplos, e repetindo cada um deles o número de vezes necessário para atingir este horizonte comum. Para este caso, o BUE dos projetos originais é preservado, enquanto que o VPL e o VFL se alteram.

Portanto, se adotarmos o valor do BUE como critério comparativo entre projetos de investimentos, deixamos de maneira implícita que estamos adotando esta hipótese simplificadora.

A segunda simplificação possível de ser feita é através do modelo de atividade cessante, que se aplica aos casos em que o horizonte do projeto é da mesma ordem de grandeza do horizonte da atividade. O autor cita como exemplo, a exploração de uma jazida mineral. Neste caso, considera-se que o valor futuro de cada projeto é aplicado no mercado a uma taxa de retorno idêntica à taxa mínima de atratividade pelo prazo suficiente para que os horizontes de todos os projetos sejam devidamente igualados.

Neste caso, o VPL do projeto aumentado é o mesmo que o do projeto original, enquanto que o BUE e o VFL se modificam. Portanto, ao adotarmos o critério do VPL para a priorização de projetos, estamos considerando implicitamente que o horizonte de cada projeto se iguala através do modelo de atividade cessante.

Finalmente, o modelo do prazo final se aplica em situações em que também o horizonte dos projetos é da mesma ordem de grandeza do horizonte da atividade, o que exclui a repetição, porém há um prazo final para o projeto ser terminado.

Neste caso, o artifício utilizado é o de se igualar o horizonte dos projetos considerando que todos eles terminam no mesmo prazo e que o investimento inicial do projeto (devidamente descontado) é aplicado no mercado a uma taxa igual à taxa mínima de atratividade enquanto espera o início.

O valor futuro do projeto aumentado é o mesmo do projeto original. Portanto, se adotarmos o VFL como critério de seleção, deixamos implícita a aplicação deste terceiro modelo para que os horizontes dos projetos em análise se igualem.

Outra importante limitação imposta pela Engenharia Econômica e muito abordada pela literatura acadêmica especializada é a falsa premissa de que ao longo do projeto seu gestor atuará de maneira passiva frente ao risco, não tomando nenhuma medida para se aproveitar do aparecimento de uma oportunidade ou para mitigar uma eventual perda.

Para Dixit e Pindyck (1994), os métodos tradicionais de análise de investimentos ignoram duas características importantes. A primeira é a de que a decisão tomada é irreversível, de modo que o investidor não conseguirá recuperar o investimento feito

de maneira integral em caso de arrependimento. A segunda delas é a possibilidade do adiamento da decisão de investir.

Há certo consenso no meio acadêmico de que a teoria das opções reais é uma alternativa razoável na tentativa de contornar estas limitações.

Brealey; Myers e Allen (2008) entendem a teoria das opções reais como uma extensão da teoria das opções financeiras. É chamada teoria das opções reais por estudar projetos de investimento baseados em ativos reais, como o investimento em uma nova planta de produção ou o aumento da capacidade produtiva de uma instalação já existente.

A teoria parte do pressuposto de que à medida que o tempo decorre, novas informações vão surgindo, a incerteza em relação ao futuro se reduz e o gestor tem a flexibilidade de tomar decisões baseando-se nessas novas informações, como por exemplo, postergar, expandir ou até mesmo abandonar um projeto. Com o auxílio de modelos matemáticos específicos, é possível mensurar essas opções de maneira que o investidor consiga potencializar seus ganhos ou minimizar suas perdas.

Para Dixit e Pindyck (1994), quando a firma decide por investir, ela exerce a opção de investir, que tem um valor que deve ser contabilizado como um custo de oportunidade no momento em que a firma toma esta decisão, o que não ocorre nos critérios tradicionais de análise. Em alguns casos, este valor pode ser significativo o suficiente para levar o gestor a cometer grandes erros de avaliação.

Vale destacar que a indústria do petróleo se caracteriza pelo uso de um capital extremamente intensivo em suas operações. Isso implica que projetos de investimentos nesta área tendem a apresentar elevado grau de rigidez, tornando suas análises através da teoria das opções reais pouco indicadas.

Nesta indústria, a análise e a priorização de investimentos é uma tarefa complexa, onde múltiplos e conflitantes objetivos devem ser atingidos, procurando-se ponderá-los para que a melhor decisão seja tomada e a utilização única e exclusiva dos métodos tradicionais baseados em fluxo de caixa descontado tende a ser demasiadamente simplificada, apresentando importantes limitações.

A maior delas é que estes métodos lidam apenas com os aspectos econômicos relacionados ao investimento, não considerando (ou considerando de maneira

inadequada) outras questões importantes, como aspectos legais, políticos, estratégicos, sociais e ambientais.

A próxima seção deste trabalho abordará os principais conceitos e ferramentas utilizados para lidar com o problema da tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios que, embora impossíveis de serem maximizados individualmente, devem levar à seleção das alternativas que apresentem o máximo benefício como um todo.

2.3. Ferramentas para Tomada de Decisão envolvendo Múltiplos Critérios

> Certo dia um executivo estava visitando meu escritório quando viu as iniciais MCDM em um artigo sobre minha mesa no qual eu estava trabalhando. Depois de muito pensar, ele me perguntou qual algarismo representava o número romano MCDM. Sorrindo, respondi a ele que MCDM era a sigla para Multiple Criteria Decision Making[1] e que isto se tratava do estudo da solução de problemas que envolvem objetivos múltiplos e conflitantes. Enquanto tentei sintetizar em poucas palavras os conceitos fundamentais a respeito do assunto, os olhos do meu amigo se iluminaram e ele respondeu "Isto é o que nós gestores fazemos o tempo todo". (ZIONTS, 1979, p. 94)

O campo da tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios pode ser definido como o conjunto de técnicas e abordagens projetadas para ajudar um tomador de decisão a fazer escolhas de uma maneira ordenada e estruturada que traduza seus valores em casos de conflito. É considerado por muitos pesquisadores como uma subárea da Pesquisa Operacional, representando uma renovação e uma revitalização desta área ao retomar sua característica principal, a de se preocupar com a solução de problemas de uma maneira científica, racional e multidisciplinar. (BOGETOFT; PRUZAN, 1991)

De uma maneira geral, os sistemas multicritérios de suporte à decisão vêm se tornando uma área extremamente produtiva no meio acadêmico, principalmente com o avanço da tecnologia computacional aplicada na solução de problemas matemáticos que permite que problemas mais complexos em diversas áreas do conhecimento possam ser modelados e solucionados de maneira mais rápida e

[1] A tradução literal do termo *Multiple Criteria Decision Making*, para o português seria o equivalente a Tomada de Decisão envolvendo Múltiplos Critérios.

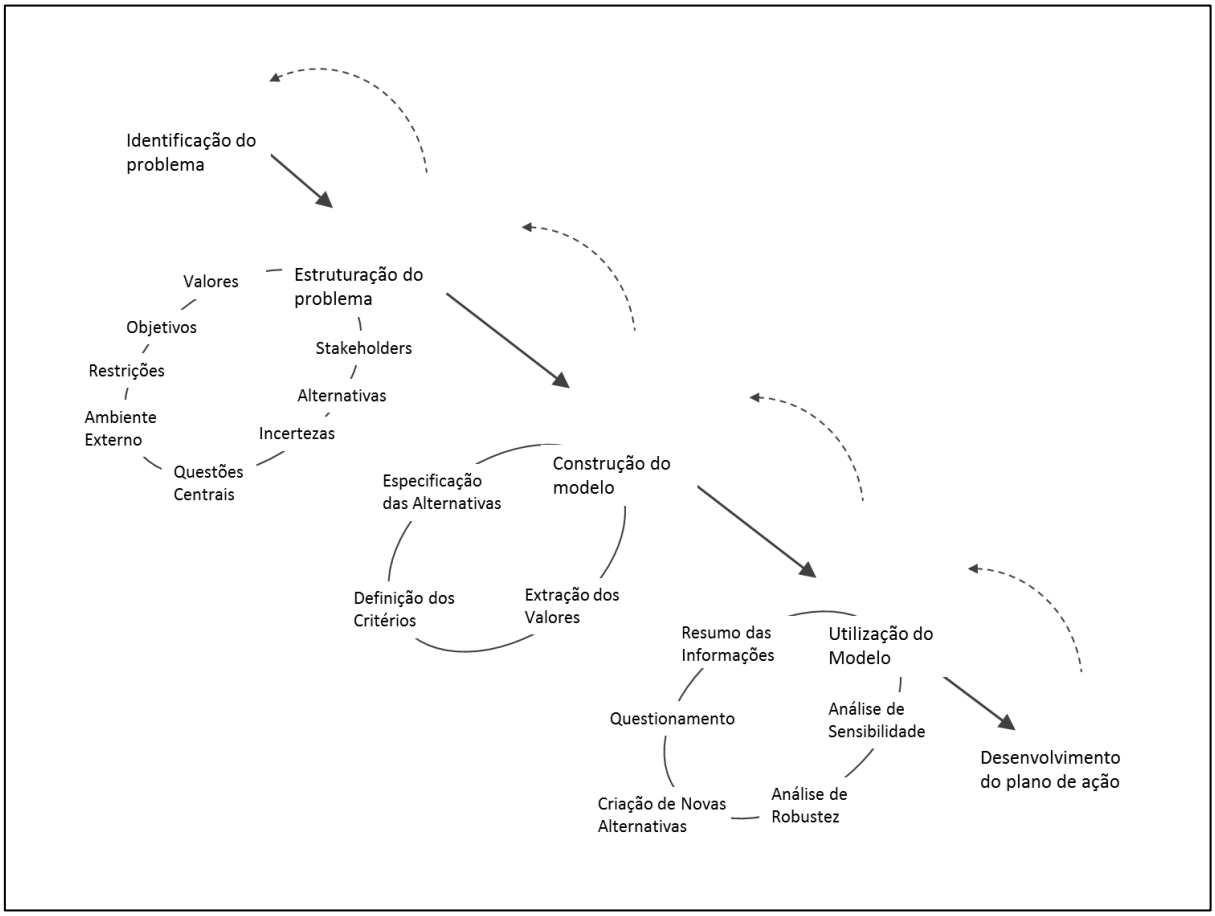
eficiente, proporcionando o aparecimento de uma grande quantidade de métodos associados às mais diversas escolas de pensamento. (BELTON; STEWART, 2002)

Uma destas áreas que vem se mostrando de maneira muito promissora para a utilização de ferramentas de tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios é o campo do planejamento energético, onde os investimentos são de capital extremamente intensivo, sujeitos a uma série de incertezas e envolvem muitos tomadores de decisão responsáveis por balancear múltiplos e conflitantes critérios. (LØKEN, 2007)

Segundo Belton e Stewart (2002), em regra, a literatura acadêmica tende a apresentar a questão da tomada de decisão como um problema dado, isto é, com um conjunto de critérios e alternativas já definidos, se concentrando em desenvolver apenas as ferramentas de valoração das alternativas em estudo. Para eles, a tomada de decisão faz parte de um processo muito mais amplo, que envolve primeiramente a identificação do problema e sua estruturação, ou seja, a caracterização dos aspectos mais importantes associados ao problema de decisão, como os objetivos envolvidos, partes interessadas, incertezas e alternativas de ação. Antes da análise propriamente dita começar a ser feita, as várias partes interessadas envolvidas no processo, como clientes, patrocinadores, facilitadores e analistas devem desenvolver uma compreensão comum do problema de decisão, do que está em jogo e quais são os critérios pelos quais essa decisão será julgada e valorada. Apenas em uma fase posterior é que o modelo é construído e resolvido. Segundo as palavras dos próprios autores, “um problema bem estruturado é um problema já resolvido pela metade”.

A figura 8 mostra como Belton e Stewart (2002) enxergam o processo de tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios.

Figura 8 – Processo de tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios.



Fonte: Belton e Stewart (2002)

Em relação ao grau de definição dos problemas de decisão, Scheubrein e Zionts (2006) os classificam em três categorias distintas: os problemas bem estruturados, os problemas semi-estruturados e os não estruturados. Segundo eles, um problema bem estruturado é aquele que já está bem compreendido e delimitado por todos e um possível procedimento para solução dele é possível de ser formulado. Por outro lado, um problema mal estruturado é aquele que necessita de um grau de definição mais alto antes que se parta para os procedimentos de análise e solução propriamente ditos. O problema semi-estruturado encontra-se entre os dois extremos, ou seja, alguns aspectos do problema estão bem estruturados e outros não.

Resumidamente, os processos disponíveis na literatura acadêmica para estruturação de problemas nada mais fazem do que transformar um problema não estruturado em um problema bem estruturado, ou seja, buscam determinar todas as

alternativas, critérios e resultados possíveis para que o processo de tomada de decisão seja conduzido de maneira ordenada.

A etapa seguinte à estruturação do problema é a construção de um modelo de análise para utilização. Este modelo deve representar dois componentes fundamentais no processo de tomada de decisão. As preferências do tomador de decisão nos termos de cada critério isoladamente e posteriormente o modelo de agregação, ou seja, o modelo que permitirá a comparação entre os critérios perante o objetivo final.

Finalmente, são desenvolvidos os planos de ação para implementação das soluções geradas. A análise em si não soluciona o problema. A ciência da administração, mais especificamente o estudo dos processos de tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios, se preocupa com a implementação dos resultados, que deverão ser traduzidas em planos de ação específicos. O processo de tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios não deve se restringir apenas à modelagem técnica, mas também deve servir como suporte para a efetiva implementação das soluções geradas.

De acordo com a classificação proposta por Belton e Stewart (2002) os métodos multicritérios de tomada de decisão adotados na literatura se enquadram essencialmente em três diferentes classes.

A primeira classe é a dos Modelos de Mensuração de Valor. Nesses modelos, uma pontuação numérica (*score*) é calculada para cada alternativa com o objetivo de se ordená-las de acordo com o grau de preferência do tomador de decisão. Inicialmente as pontuações são desenvolvidas para cada critério e posteriormente elas são agregadas nos níveis mais elevados do modelo de preferência.

A segunda classe é a dos Modelos Dirigidos por Metas, Aspirações ou Níveis de Referência. Nestes tipos de modelo, níveis desejáveis ou satisfatórios de realização são estabelecidos para cada critério e o modelo buscará descobrir quais são as opções que de alguma maneira atendem a estas metas ou níveis de aspiração desejados.

A terceira classe é a dos Modelos de Sobreclassificação, nos quais cursos alternativos de ação são comparados paritariamente de acordo com cada critério, com o objetivo de se identificar a extensão na qual uma alternativa é preferível em

relação à outra. Ao se agregar as informações de preferência para todos os critérios da análise, o modelo buscará estabelecer a força das evidências que favorecem a escolha de uma alternativa em detrimento de outra.

Para Wallenius et al. (2008), para que se indique o tipo de modelo mais adequado para um determinado problema de escolha, deve-se determinar se é um problema de alternativas discretas ou um problemas de otimização.

Segundo os autores, enquanto os problemas de alternativas discretas, como a escolha da localização de um novo aeroporto ou construção de uma nova fábrica, são caracterizados por um conjunto relativamente pequeno de alternativas, os problemas de otimização consistem em um conjunto muito grande, às vezes até infinito de alternativas possíveis, definidas através de um conjunto de equações e inequações, requerendo uma capacidade computacional muito mais ampla do que os problemas de alternativas discretas.

Outra característica que distingue os problemas de alternativas discretas dos problemas de otimização é que os problemas de alternativas discretas são mais propensos a serem modelados com valores incertos para seus atributos ou critérios do que os problemas de otimização.

Uma grande diferença entre esses dois tipos de modelos diz respeito à forma como as funções de valor ou utilidade são levadas em consideração. Enquanto que os problemas de alternativas discretas tentam representar aspectos da utilidade ou da função de valor do tomador de decisão e aplicar estes resultados para estimar a utilidade das alternativas, nos problemas de otimização esta tentativa não ocorre. O problema é estruturado de tal maneira que, de uma maneira iterativa, se extraia e use informações implícitas a respeito das preferências do tomador de decisão com o intuito de direcioná-lo para sua solução preferida.

Por informação implícita entende-se por responder a perguntas como “quais das duas soluções é preferível?” ou “qual dos muitos vetores de *tradeoff* é preferível?” e qual valor de critério pode-se abrir mão para se permitir melhorias em outros critérios mais importantes?”.

Se as informações extraídas forem suficientes para possibilitar um procedimento interativo que possa convergir para uma solução final em um número razoável de

iterações, a solução final obtida pode ser considerada ótima ou boa o suficiente para que o processo decisório seja finalizado.

Devido a estas diferentes características, diferentes abordagens foram sendo desenvolvidas para solucionar os mais diversos tipos de problemas. Para a solução dos problemas de alternativas discretas, usualmente são utilizados os chamados modelos de mensuração de valor, ou métodos da escola americana, como a teoria da utilidade, descrita por Keeney e Raiffa (1976) e o Analytic Hierarchy Process (AHP), conforme descreve Saaty (1999). Alternativamente aos métodos da escola americana, há os métodos desenvolvidos pela escola francesa, baseados em ordenamento parcial e sobreclassificação, como os métodos da família ELECTRE e os métodos da família PROMETHEE.

As abordagens para se resolver os problemas de otimização caem nas categorias principalmente dos métodos interativos, programação por metas e algoritmos evolucionários.

As seções abaixo abordarão de maneira mais detalhada as características essenciais que compõem cada tipo de modelo.

2.3.1. Modelos de Mensuração de Valor

A principal característica apresentada pelos modelos que compõem esta categoria é que todos eles trabalham com a geração de uma função de valor responsável por atribuir uma pontuação numérica a cada alternativa estudada. Estas alternativas posteriormente são ordenadas de forma que as alternativas que apresentam maior pontuação são preferíveis em relação às alternativas de menor pontuação. A utilização destes modelos requer a atribuição de pesos a cada um dos critérios considerados na avaliação, representando a contribuição parcial para a pontuação geral da alternativa e se baseando na importância que cada critério tenha para o tomador da decisão. Em outras palavras, nesta classe de modelos, os pesos indicam a relação de compensação existente entre dois critérios para o tomador de decisão. (LØKEN, 2007).

A mais simples e mais utilizada forma de função de valor é dado pela equação abaixo:

$$V(a) = \sum_{i=1}^{m} w_i v_i(a) \qquad (9)$$

Onde:

V(a) é o valor total da alternativa “a”

v_i(a) é a pontuação parcial da alternativa “a” associada ao critério “i”

w_i é o peso atribuído para refletir a importância do critério “i”

A teoria da utilidade proposta por Keeney e Raiffa (1976) é um dos principais exemplos de modelo de mensuração de valor, incorporando riscos, preferências e incertezas dentro de um sistema multicritérios de apoio à decisão, se utilizando da ideia de que um determinado tomador de decisão buscará sempre uma solução que maximize a sua satisfação (utilidade), sendo esta satisfação medida por uma função objetivo denominada função utilidade.

Estes valores variam dentro de uma escala e as alternativas que proporcionam o maior benefício são ordenadas de acordo com a pontuação calculada. (SHIMIZU, 2001)

Como os problemas de tomada de decisão multicritérios frequentemente apresentam objetivos conflitantes entre si, não existe uma solução ótima que satisfaça plenamente todos os critérios considerados. O modelo busca uma solução de consenso capaz de satisfazer os objetivos parcialmente, de modo que a soma da utilidade de cada um deles seja a maior possível.

Outro exemplo, de modelo de mensuração de valor é o Analytical Hierarchy Process (AHP), de Saaty (1980). Embora desenvolvido de maneira independente de outras teorias de decisão, Belton e Stewart (2002) definem o AHP como “um método alternativo para induzir uma função de valor”, já que seus resultados são

apresentados sob a forma de uma lista ordenada de acordo uma pontuação numérica.

A principal característica do AHP é que ele se utiliza da comparação par a par entre as alternativas sob o foco de cada critério de análise. Após essa comparação, os resultados são colocados em matrizes que são agregadas em uma lista de classificação única. A alternativa que apresentar a maior pontuação é a preferida em relação às outras.

A grande desvantagem é que à medida que o número de critérios aumenta, aumenta-se também o número de comparações paritárias, tornando o modelo muito complexo. Saaty (1980) recomenda a utilização de no máximo nove fatores de comparação. Além deste número, a matriz começa a se tornar inconsistente. Outra desvantagem associada ao método está na dificuldade de se inserir ou excluir um novo critério ou na alteração relativa das prioridades entre os fatores existentes.

Uma generalização do método AHP é o Analytic Network Process (ANP), que considera a interdependência entre os elementos da hierarquia, indicado para a solução de problemas que não podem ser estruturados de maneira hierárquica, pois envolvem a interação e a dependência de elementos de nível superior com elementos de níveis inferiores. (SAATY, 2005)

No ANP, a estrutura do problema é representada por uma rede, com ciclos e loops conectando os componentes dos elementos que não podem mais ser chamados de níveis. A grande dificuldade do método está em se determinar as prioridades dos elementos da rede, das alternativas de decisão e de se justificar a validade do resultado obtido pela sua aplicação, tornando-o muito mais trabalhoso de ser aplicado e menos intuitivo que o AHP.

O Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), por sua vez, se baseia na ideia de que a alternativa escolhida deve ter a distância geométrica mais curta em relação a uma solução considerada ideal e a distância geométrica mais longa em relação a uma solução considerada “anti-ideal”, oposta à solução ideal. O método compara um conjunto de alternativas atribuindo pesos para cada critério e calculando a distância geométrica entre cada alternativa e a alternativa ideal, estabelecendo como melhor solução aquela que apresenta a maior

proximidade relativa da solução ideal, que é uma proporção entre a distância geométrica entre a solução ideal e a solução “anti-ideal”.

Pode-se dizer, de uma maneira geral, que os modelos de mensuração de valor são os mais utilizados na prática para a análise de problemas de tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios, muito devido à sua transparência, instintividade e facilidade de manipulação. Estes atributos, no entanto, também devem representar um motivo de preocupação. Deve-se sempre estar claro se as premissas que validam o modelo estão aderentes e corretas e se os tomadores de decisão compreendem de maneira adequada todas as questões colocadas, particularmente em relação à importância dos critérios. (BELTON; STEWART, 2002)

Para Belton e Stewart (2002), os modelos de mensuração de valor obrigam o tomador de decisão a estabelecer preferências relativas entre possíveis alternativas, seja pela atribuição direta de um valor numérico ou por uma escala qualitativa interpretada de maneira quantitativa, tornando a solução do modelo muito trabalhosa quando há um grande número de alternativas e critérios envolvidos na análise, como nos estágios mais iniciais da análise, em que o objetivo é apenas o de se produzir uma lista reduzida das alternativas mais promissoras.

Neste tipo de situação, é mais vantajoso se estabelecer procedimentos de arbitragem de funções de valor que requerem dados de entrada menos precisos que os necessários para que os métodos de mensuração de valor funcionem de maneira adequada.

2.3.2. Modelos Direcionados por Metas, Aspirações e Níveis de Referência

Os modelos direcionados por metas, aspirações e níveis de referência são aqueles que buscam determinar as alternativas que mais se aproximam de um determinado objetivo ou nível de aspiração. Frequentemente, estes métodos são utilizados em uma fase preliminar do processo de tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios, quando o número de alternativas consideradas ainda é muito elevado, filtrando aquelas que se apresentam de maneira mais promissora para uma análise

posterior mais aprofundada. O tipo de modelo mais difundido desta classe de modelos é o chamado modelo de programação por metas (GP[2]).

Segundo Belton e Stewart (2002), os primeiros algoritmos de programação por metas nada mais eram do que uma generalização da tradicional programação linear. Enquanto que a programação linear buscava a maximização (ou minimização, dependendo do caso) de apenas um objetivo, a programação por metas buscava otimizar os múltiplos e conflitantes objetivos de um problema de decisão como um todo, tentando encontrar uma solução que alcançasse um nível de satisfação aceitável por parte do tomador de decisão em cada um de seus objetivos.

Posteriormente, os algoritmos de programação por metas foram se tornando mais sofisticados, e passaram a lidar também com problemas não lineares.

Qualquer algoritmo de programação por metas segue ao menos dois princípios fundamentais. O primeiro princípio é o de que cada critério deve ser definido com um atributo medido em uma escala numérica e mensurável. A programação por metas não deve ser aplicada em situações nas quais um ou mais critérios são representados por constructos ou escalas categóricas. O segundo princípio é o de que o tomador de decisão deve expressar juízos de valor em termos de objetivos ou níveis de aspiração para cada critério, definidos em termos de níveis desejados de desempenho para os valores dos atributos correspondentes.

Segundo Løken (2007), matematicamente, pode-se dizer que a ideia por trás desta categoria de métodos é a resolução da seguinte inequação:

$$z_i + \delta_i \geq g_i \qquad (10)$$

Onde:

z_i corresponde ao valor do atributo

δ_i corresponde ao desvio não negativo da variável

g_i corresponde aos objetivos para cada um dos i critérios

[2] Do termo em inglês "*Goal Programming*".

Hipoteticamente, a solução ideal para um problema multicritérios através de um algoritmo de programação por metas seria se todos os δ_i fossem iguais a zero para todos os critérios considerados. O algoritmo mais simples para solução de um problema deste tipo é o que minimiza a seguinte função objetivo:

$$\sum_{i=1}^{m} w_i . \delta_i \qquad (11)$$

Onde

w_i corresponde ao peso atribuído ao critério i

δ_i corresponde ao desvio do critério i

Embora a programação por metas seja muito utilizada principalmente devido à sua simplicidade, a maior limitação em relação a ela está na violação de um conceito fundamental da teoria da decisão, ao não garantir que a solução encontrada seja uma solução eficiente de Pareto, ou seja, que implique que os recursos estejam alocados de maneira ótima, e que se torne impossível tornar um aspecto melhor sem necessariamente piorar outro. Alguns estudos como o desenvolvido por Romero (1991) e por Tamiz; Mirrazavi e Jones (1999) tentam contornar esta limitação, apresentando ferramentas para se identificar este tipo de problema e se projetar uma nova solução que se enquadre como eficiente de Pareto.

Outro aspecto criticado em relação à Programação por Metas é o estabelecimento dos pesos relativos para cada critério. Gass (1986) defende a ideia de que os pesos devem ser atribuídos através de métodos interativos. Em seu estudo ele introduz o uso do AHP para essa finalidade.

2.3.3. Modelos de Sobreclassificação

A terceira categoria de modelos de tomada de decisão multicritérios apresentada por Belton e Stewart (2002) são os chamados modelos de sobreclassificação, também

conhecidos como métodos da escola francesa para solução de problemas multicritérios.

Esta classe de modelos se diferencia dos modelos de mensuração de valor por não se utilizarem de funções de valor agregativas, sendo o resultado final da aplicação do modelo, uma relação de sobreclassificação de um conjunto de alternativas, sem a atribuição de um valor numérico para cada uma delas.

Uma alternativa “a” sobreclassifica uma alternativa “b” se, levando-se em consideração toda a informação disponível a respeito do problema de tomada de decisão e as preferências do tomador de decisão, há argumentos fortes o suficiente para suportar a conclusão de que a alternativa “a” é ao menos tão boa quanto a alternativa “b” e não há argumentos o suficiente que evidencie o contrário.

Segundo Løken (2007), nos modelos de preferência, as alternativas são comparadas par a par para se verificar qual delas é preferível sob a ótica de cada critério. Quando as informações são devidamente agregadas, é possível se estabelecer com que dimensão uma alternativa supera a outra. Diz-se que a alternativa “a” supera a alternativa “b” se há evidências o suficiente para se concluir que a alternativa “a” é tão boa quanto a alternativa “b” quando se leva em consideração todos os critérios simultaneamente.

As duas principais famílias de métodos que compõem esta categoria são os métodos do grupo ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) e suas evoluções, ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE IS e ELECTRE TRI, desenvolvidos por Bernard Roy e os métodos da família PROMETHEE, desenvolvido por Jean Pierre Brans e seus colaboradores.

A ideia principal destes métodos é escolher as alternativas preferíveis para a maioria dos critérios, se utilizando dos chamados limites de indiferença e da estrita preferência. Alternativas consideradas extremamente desfavoráveis para qualquer um dos critérios não devem ser escolhidas, mesmo que sejam favoráveis para a maioria dos outros critérios. Eventualmente, estes métodos não conseguem encontrar uma solução ótima, no entanto, eles ajudam, no início do processo de tomada de decisão, a se produzir uma lista reduzida com as melhores alternativas, que podem ser analisadas por outros métodos na busca pela melhor solução.

Para Mendonça; Infante e Valle (2010), uma das principais características dos métodos da família ELECTRE, que o distinguem dos métodos de atribuição de valor é que eles não são compensatórios, ou seja, bons resultados em um determinado critério não podem compensar resultados muito ruins em outros.

Essencialmente, todos os métodos da família ELECTRE são baseados nos mesmos conceitos fundamentais, se diferenciando no grau de sofisticação e no tipo de problema que ele se propõe a resolver.

Já o método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method) se apresenta como uma evolução dos métodos da família ELECTRE, uma vez que se propõe a eliminar uma série de parâmetros que não têm significado para o tomador de decisão.

Os métodos PROMETHEE se utilizam de uma comparação par a par para se construir uma função de preferência para cada critério. Baseando-se nesta função de preferência, um indicador de preferência da alternativa “a” pela alternativa “b” é estabelecido, suportando ou refutando uma hipótese inicial de que “a” eventualmente seja melhor do que “b”. Este indicador é calculado através de uma média ponderada das preferências para cada uma dos critérios e utilizado para se valorar as relações de preferência, determinando-se a classificação das alternativas consideradas.

A metodologia PROMETHEE apresenta principalmente duas versões. A PROMETHEE I, que faz uma sobreclassificação parcial entre as alternativas e reconhece que algumas alternativas não podem ser comparadas entre si e a PROMETHEE II que proporciona uma pontuação cardeal para cada alternativa, que pode ser usada para desenvolver uma completa ordenação entre as alternativas. (BASTOS; ALMEIDA, 2002)

Embora as versões PROMETHEE I e PROMETHEE II sejam as mais difundidas, outras versões também podem ser citadas, como o PROMETHEE III, utilizado para problemas de classificação baseados em intervalos, o PROMETHEE IV, para classificação completa ou parcial de alternativas quando o conjunto de soluções viáveis é contínuo, o PROMETHEE V, utilizado para a segmentação de restrições, o PROMETHEE VI, buscando representar um modelo semelhante ao modo de pensar humano, o PROMETHEE GDSS para decisões em grupo e o módulo visual

interativo GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid) para representações gráficas. (BEHZADIAN et al., 2010)

Segundo Brans e Mareschal (2005), a popularidade dos métodos da família PROMETHEE é devida às suas propriedades matemáticas e sua interface amigável.

2.3.4. Lógica Fuzzy

A teoria dos conjuntos difusos (fuzzy sets) foi inicialmente apresentada por Zadeh (1965) para lidar com problemas em que os dados de entrada apresentam imprecisão ou se apresentam de maneira vaga e incerta. Sua primeira aplicação no contexto da tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios ocorreu em Bellman e Zadeh (1970).

Conforme argumenta Zadeh (1965), no mundo real, é muito frequente nos depararmos com situações em que é difícil se determinar se um determinado objeto faz parte ou não faz parte de um determinado conjunto. O autor cita como exemplo o conjunto dos animais. É muito claro que o reino dos animais inclui cachorros, cavalos ou pássaros, e que exclui outros objetos como plantas ou pedras. No entanto, é difícil se determinar se uma estrela do mar ou uma bactéria podem ser consideradas animais ou não. O mesmo tipo de confusão ocorre ao tentar se determinar se o algarismo “10” pode ou não ser incluído no conjunto dos números muito maiores do que um.

Claramente a classe de todos os números reais que são muito maiores do que um, ou o conjunto dos homens altos não podem ser definidos de acordo com a teoria matemática convencional dos conjuntos.

Contrapondo-se à teoria dos conjuntos convencionais, Zadeh (1965) introduziu a teoria dos conjuntos nebulosos (*fuzzy sets*), uma “classe” de conjuntos em que as transições de um conjunto para outro ocorrem de maneira contínua e gradativa, se utilizando de propriedades matemáticas semelhantes às utilizadas nos conjuntos tradicionais, mas de uma maneira mais generalista.

A lógica matemática que fundamenta toda a teoria convencional dos conjuntos é baseada em uma lógica booleana, ou seja, dada uma declaração qualquer, ou ela é verdadeira ou é falsa, não havendo possibilidades intermediárias.

A determinação se um elemento “x” qualquer pertence ou não a um determinado conjunto “A”, pode ser feita através de uma função indicativa $I_A(x)$. Para qualquer objeto “x”, se $I_A(x) = 1$, “x” pertence à “A”, enquanto que se $I_A(x) = 0$, x não pertence à “A”, ou seja, a função $I_A(x)$ indica se a declaração “x pertence à A” é verdadeira ou não. Esta lógica booleana, muitas vezes representa de maneira inadequada as percepções e preferências do raciocínio humano, e por esta razão, Zadeh (1965) introduziu a teoria dos conjuntos nebulosos, substituindo a função indicativa por uma função de pertinência “$\mu_A(x)$”, de tal forma que $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$, sendo que o valor de “$\mu_A(x)$” indica a extensão na qual o elemento “x” pertence ou não ao conjunto “A”, ou o quanto é verdadeira a declaração de que “x” pertence à “A”. (BELTON; STEWART, 2002)

Matematicamente, um conjunto nebuloso “A” qualquer é representado por:

$$A = \{x; \mu_A(x)/x \in X\} \qquad (12)$$

Onde:

X representa o conjunto universo de todos os elementos “x”.

$\mu_A(x)$ é a função de pertinência que indica em que grau o elemento “x” pertence ou não ao conjunto “A”.

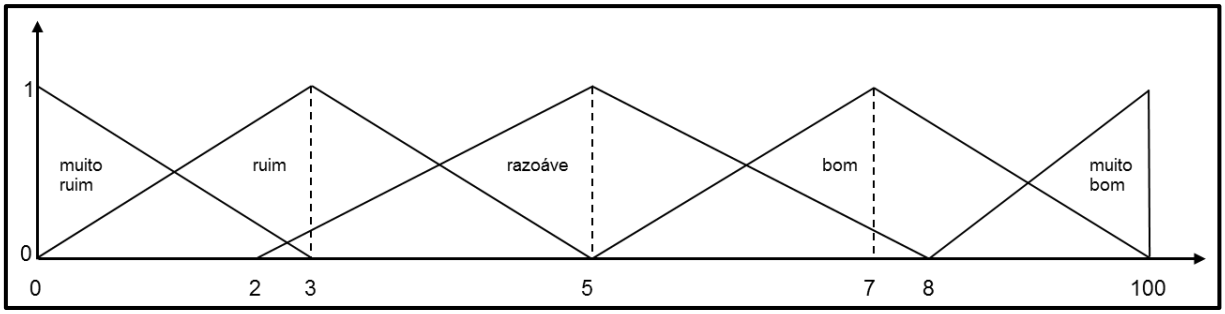
Se o valor da função pertinência para um determinado elemento for igual a um, temos certeza absoluta que este elemento pertence ao conjunto difuso. No caso de a função pertinência calculada para o elemento for igual à zero, temos certeza absoluta que o elemento não pertence ao conjunto. Para o caso de valores calculados entre zero e um, afirmamos que o elemento pode ou não pertencer ao conjunto com maior ou menor afinidade.

A lógica fuzzy, portanto, é uma lógica multivalores que permite que valores intermediários sejam definidos entre as avaliações convencionais como falso/verdadeiro, sim/não ou branco/preto. Classificações como “quase abafado” ou

“frio intenso” podem ser formuladas matematicamente através de funções de pertinência e processadas pelo computador, possibilitando que a linguagem humana seja interpretada com maior eficácia. (MARTINEZ JUNIOR, 2002)

O exemplo ilustrado na figura 9 mostra como formulações subjetivas como “muito ruim”, “ruim”, “razoável”, “bom” e “muito bom” podem ser convertidas em valores numéricos através do uso de funções de pertinência.

Figura 9 – Funções de pertinência para cinco níveis de variáveis linguísticas.



Fonte: Tzeng e Huang (2011)

A função de pertinência cujo comportamento seja normal, isto é, quando existe pelo menos um valor de “x” em seu domínio cujo resultado da função de pertinência seja igual a 1, e convexo é chamada de número fuzzy.

Vale lembrar, que um conjunto nebuloso qualquer “A” é considerado convexo quando sua função de pertinência apresentar para qualquer par de elementos $x_{1,\ X2}$ de seu domínio, e para qualquer valor de λ entre 0 e 1 a seguinte relação:

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2 \geq \min\big(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)\big) \qquad (13)$$

Portanto, matematicamente, um número fuzzy é definido como um subconjunto nebuloso do conjunto universo ”X”, cuja função de pertinência é definida dentro do conjunto dos números reais, representando um intervalo cuja fronteira é nebulosa.

Da mesma forma que se efetuam operações aritméticas entre números reais, como a adição, a subtração, a multiplicação e a divisão, pode-se efetuar estas mesmas

operações entre números fuzzy, seguindo-se o método conhecido como "α-cut", proposto por Dubois e Prade (1978).

O método "α-cut" nada mais faz do que estender os conceitos envolvendo operações aritméticas entre intervalos para as operações envolvendo números fuzzy. As operações intervalares são realizadas para cada nível de pertinência, ou para cada "α-cut" dos números fuzzy envolvidos. (GAO; ZHANG; CAO, 2009)

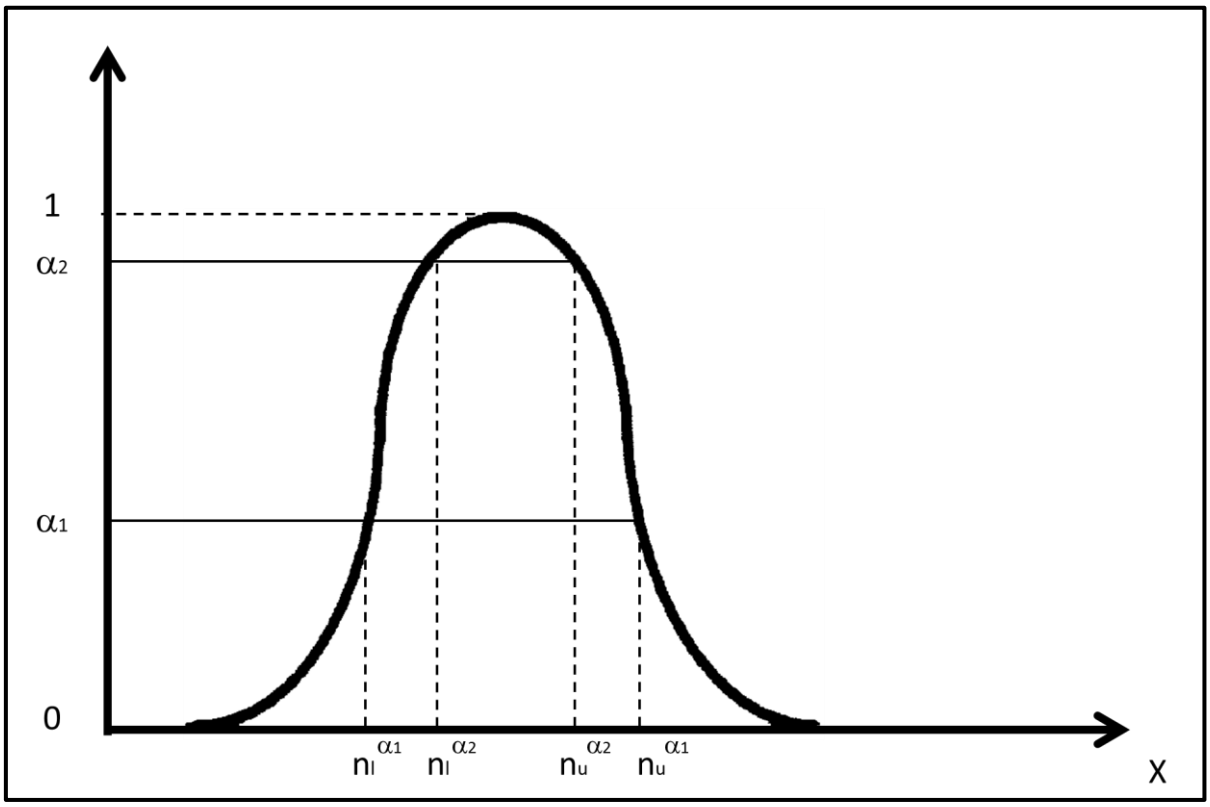
O conjunto "α-cut", ou corte no nível α, de um número fuzzy "n" qualquer é definido como o intervalo fechado contido no universo "X" que contém todos os elementos que possuem grau de pertinência maior ou igual ao valor arbitrado de α.

Matematicamente, o "α-cut" de um número fuzzy "n" é definido por:

$$n^{\alpha} = \{x_i : \mu_n(x_i) \geq \alpha, x_i \in X\} \qquad (14)$$

A figura 10 mostra um número fuzzy "n" com dois "α-cuts", "α_1" e "α_2".

Figura 10 – Número fuzzy "n" com dois "α-cuts", "α_1" e "α_2".



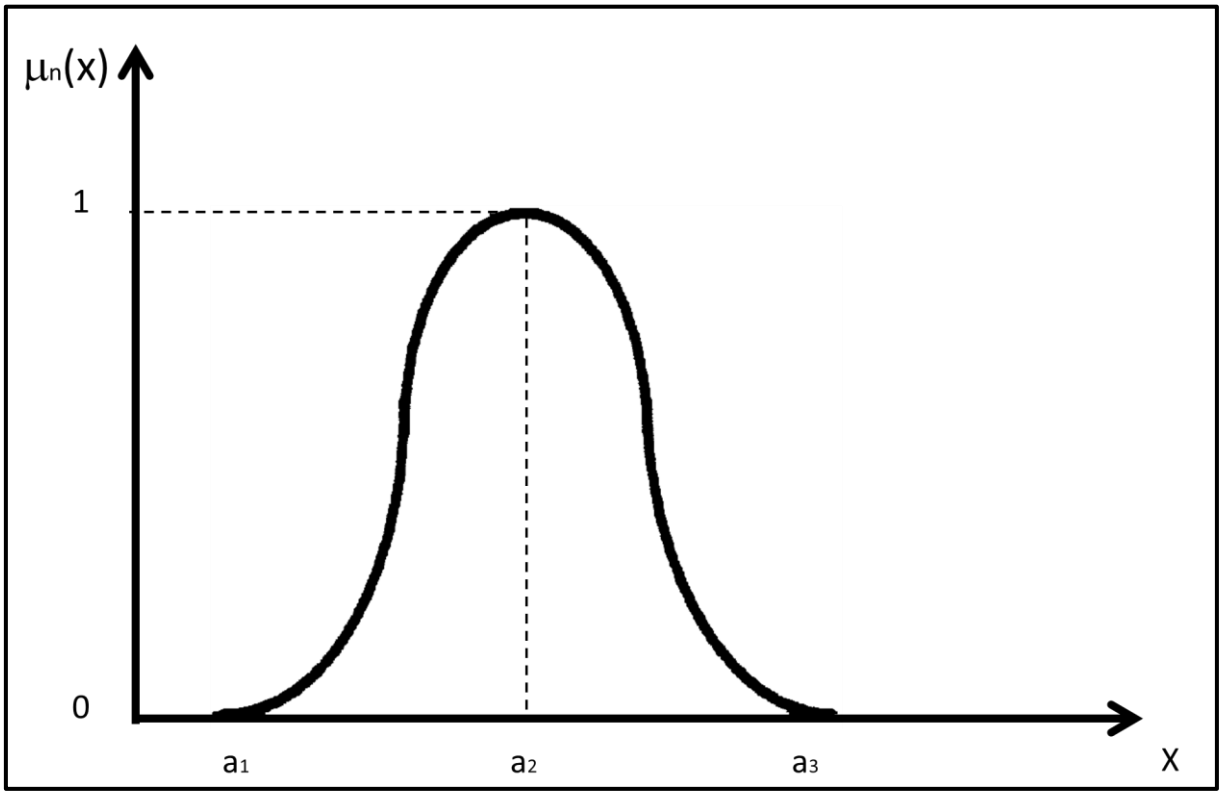
Fonte: Chen (2000)

O nível de pertinência α, para qualquer valor entre 0 e 1, fornece uma função monótona decrescente de α. Ou seja, para todo valor de α_1 maior que α_2, implica-se necessariamente em um intervalo "α_1-cut" maior do que o intervalo "α_2-cut".

Desta forma, aplica-se a aritmética intervalar tradicional para cada intervalo definido por um "α-cut" de forma independente.

Normalmente os números fuzzy são representados através de dois pontos extremos, que indicam o valor mínimo e o valor máximo de "x", e um ponto médio, que indica o valor de "x" cuja função de pertinência seja igual a 1. A figura 11 indica a representação gráfica de um número fuzzy.

Figura 11 – Número fuzzy "n".



Fonte: Adaptado de Chen (2000)

Dentre as diversas formas possíveis que um número fuzzy pode assumir, a mais comum é a triangular. Um número fuzzy triangular "n" pode ser definido por um grupo de três números (n_1, n_2, n_3), onde "n_1" representa o valor mínimo de "x", "n_2" o ponto médio, cuja função de pertinência seja igual a 1, e "n_3" o valor máximo.

Para números fuzzy triangulares, a função pertinência $\mu_n(x)$ é definida por:

$$\mu_n(x) = \begin{cases} 0, & x < n_1 \\ \dfrac{x - n_1}{n_2 - n_1} & n_1 \leq x \leq n_2 \\ \dfrac{x - n_3}{n_2 - n_3} & n_2 \leq x \leq n_3 \\ 0, & x > n_3 \end{cases} \qquad (15)$$

Sendo “n” e “m” dois números fuzzy triangulares positivos definidos respectivamente por (n_1, n_2, n_3) e (m_1, m_2, m_3) e “k” um número real positivo, as principais operações aritméticas envolvendo estes números são:

$$n \oplus m = (n_1 + m_1, n_2 + m_2,\ n_3 + m_3) \qquad (16)$$

$$n \ominus m = (n_1 - m_3, n_2 - m_2,\ n_3 - m_1) \qquad (17)$$

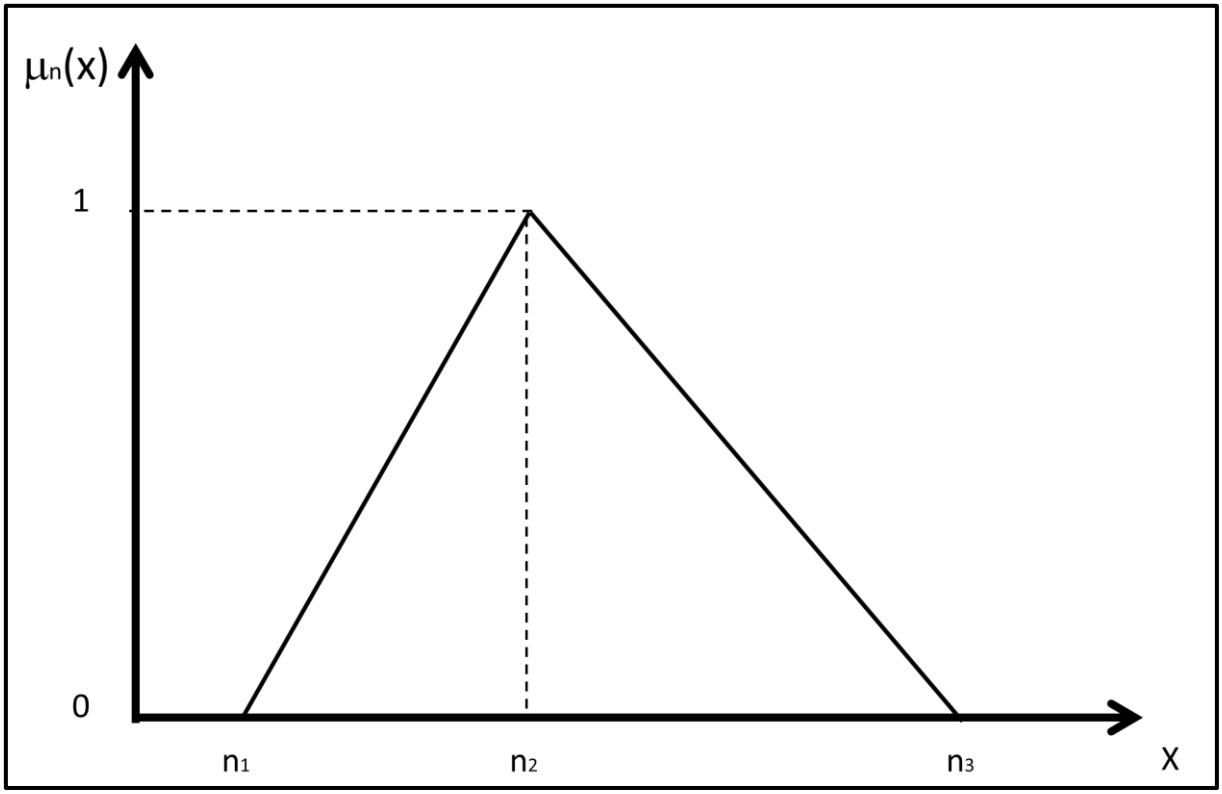
$$k \otimes n = (kn_1, kn_2, kn_3) \qquad (18)$$

$$n \otimes m \cong (n_1.m_1, n_2.m_2,\ n_3.m_3) \qquad (19)$$

$$n \oslash m \cong \left(\frac{n_1}{m_3}, \frac{n_2}{m_2}, \frac{n_3}{m_1}\right) \qquad (20)$$

A figura 12 indica a representação gráfica de um número fuzzy triangular.

Figura 12 – Número fuzzy triangular “n”.



Fonte: Chen (2000)

Vale lembrar que nos casos específicos da multiplicação e da divisão entre números fuzzy triangulares, o cálculo rigoroso através das multiplicações e divisões das respectivas funções de pertinência não implicam necessariamente em se obter um número fuzzy triangular como resultado. Alternativamente, a literatura técnica recomenda as operações acima como forma de se obter um resultado bastante aproximado dessas operações.

Segundo Shimizu (2001) operações com sistemas difusos estão sendo cada vez mais utilizadas, a fim de completar, expressar ou operar, com maior naturalidade, as regras de conhecimento existentes nos bancos de dados de especialistas. Por meio desses recursos, o processo de tradução automática ou processamento automático de uma linguagem natural está tendo progressos maiores.

Essencialmente, os conjuntos nebulosos proporcionam um arcabouço natural para lidar com problemas nos quais a natureza da imprecisão é a ausência de um critério de pertinência definido de maneira nítida, podendo ser utilizada, por exemplo, na

área médica, para orientar a escolha do medicamento ou do tratamento mais adequado diante de determinado quadro clínico, ou na administração pública, para determinar qual o melhor investimento a ser feito nos bairros de uma cidade. (COSTA; ABRAMCZUK; MARTINEZ JUNIOR, 2007)

Belton e Stewart (2002) não classificam os conceitos associados aos conjuntos nebulosos como uma escola separada de modelos de preferência e sim como uma ferramenta que permeia todas as escolas e que pode ser utilizada em qualquer outro método apresentado nas seções anteriores.

2.3.5. A metodologia Fuzzy TOPSIS

Os modelos de mensuração de valor clássicos utilizados nos processos de tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios, incluindo neste rol a metodologia TOPSIS, partem do pressuposto de que se pode atribuir com exatidão tanto os pesos relativos aos critérios, como se efetuar a avaliação propriamente dita das alternativas de decisão. Porém, em muitas situações reais, valores exatos não expressam de maneira adequada o julgamento humano, uma vez que este costuma ser vago e impreciso.

Visando contornar esta limitação, Chen (2000) introduziu uma modificação à metodologia TOPSIS original. Nesta nova metodologia, denominada Fuzzy TOPSIS, ao invés de os julgamentos serem expressos por variáveis numéricas tradicionais, eles são feitos através de variáveis linguísticas que posteriormente são convertidas em variáveis numéricas através da utilização de números fuzzy triangulares.

Da mesma maneira que ocorre com a metodologia TOPSIS clássica, a versão fuzzy fundamenta-se no princípio de que, em um processo decisório, a melhor alternativa é aquela cuja distância geométrica mais se aproxima de uma solução considerada ideal (solução ideal positiva) e mais se afasta de uma solução considerada não ideal (solução ideal negativa).

Supondo-se um problema literal de decisão composto por “n” alternativas de decisão e “m” critérios de avaliação, a primeira etapa da metodologia é a construção de uma tabela de informações semelhante à apresentada na tabela 1.

Alternativas	Critérios				
	C_1	C_2	C_3	...	C_m
A_1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	…	x_{1m}
A_2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	…	x_{2m}
A_3	x_{31}	x_{32}	x_{33}	…	x_{3m}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
A_n	x_{n1}	x_{n2}	x_{n3}	…	x_{nm}
W (peso)	w_1	w_2	w_3	…	w_m

Tabela 1 - Tabela de informações de um problema literal de decisão composto por “n” alternativas de decisão e “m” critérios de avaliação.

Onde:

A_1 à A_n representam as “n” alternativas em análise

C_1 à C_m representam os “m” critérios de avaliação

w_1 à w_m representam os pesos de cada critério de avaliação

x_{kj} representa a avaliação da alternativa “k” sob a perspectiva do critério de avaliação “j”

Como os dados normalmente apresentam dimensões distintas, a tabela de informações deve ser normalizada. O objetivo da normalização é transformar a tabela de informações em uma matriz adimensional para possibilitar a comparação dos critérios entre si.

A normalização das avaliações obtidas para cada alternativa de decisão é feita através da seguinte transformação linear escalar.

$$r_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*}\right), j \in B \qquad (21)$$

$$r_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}}\right), j \in C \qquad (22)$$

Onde:

(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}) representa o número fuzzy gerado pela avaliação da alternativa “i” sob a ótica do critério de avaliação “j”.

r_{ij} representa a avaliação normalizada da alternativa “i” sob a ótica do critério de avaliação “j”.

B representa os critérios de benefício;

c^*_j representa o máximo valor de c_{ij} em i se j pertence à B;

C representa os critérios de custo;

a^-_j representa o mínimo valor de a_{ij} em i se j pertence à C;

Considerando-se a diferente importância relativa entre os critérios, pondera-se a matriz obtida na etapa anterior e constrói-se uma nova matriz de decisão fuzzy, normalizada e ponderada, dada pelas equações 23 e 24.

$$V = [v_{ij}]_{m \times n}, \qquad i = 1,2, \dots, m, \qquad j = 1,2, \dots, n \qquad (23)$$

$$v_{ij} = r_{ij}.w_j \qquad (24)$$

Onde:

v_{ij} representa a avaliação normalizada e ponderada da alternativa “i” sob a ótica do critério de avaliação “j”.

r_{ij} representa a avaliação normalizada da alternativa “i” sob a ótica do critério de avaliação “j”.

w_j representa o peso relativo do critério de avaliação “j”.

Em seguida, define-se a solução positiva ideal fuzzy (FPIS) e a solução negativa ideal fuzzy (FNIS) através das equações 25 e 26.

$$FPIS = \left(v_1^*, v_2^*, \dots, v_j^*, \dots v_n^*\right) \qquad (25)$$

$$FNIS = \left(v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots v_n^-\right) \qquad (26)$$

Onde:

$v^*_1, v^*_2, \dots, v^*_j, \dots, v^*_n$ são iguais ao número fuzzy (1,1,1)

$v^-_1, v^-_2, \dots, v^-_j, \dots, v^-_n$ são iguais ao número fuzzy (0,0,0)

A distância entre cada uma das alternativas para FPIS e para FNIS é calculada pelas equações 27 e 28.

$$d_i^* = \sum_{j=1}^{n} d\left(v_{ij}, v_j^*\right), \qquad i = 1,2, \dots m \qquad (27)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^{n} d\left(v_{ij}, v_j^-\right), \qquad i = 1,2, \dots m \qquad (28)$$

Onde:

v_{ij} representa a avaliação normalizada e ponderada da alternativa “i” sob a ótica do critério de avaliação “j”;

v^*_j é a solução positiva ideal em relação ao critério “j” e igual ao número fuzzy (1,1,1);

v^-_j é a solução negativa ideal em relação ao critério “j” e igual ao número fuzzy (0,0,0);

d^*_i representa a distância calculada entre a alternativa “i” e a solução positiva ideal (FPIS);

d^-_i representa a distância calculada entre a alternativa “i” e a solução negativa ideal (FNIS);

Chen (2000) recomenda que o cálculo da distância entre as alternativas e as soluções ideais seja feita através do método do vértice, proposto por Dong e Shah (1987).

O método do vértice estabelece que, sendo “m” e “n” dois números fuzzy triangulares, definidos por m = (m_1, m_2, m_3) e n = (n_1, n_2, n_3), a distância entre estes dois números será dada pela equação 29.

$$d(m,n) = \sqrt{\frac{1}{3}[(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2]} \qquad (29)$$

Finalmente, o coeficiente de proximidade é determinado para cada alternativa para se estabelecer a ordem de preferência entre elas (equação 30).

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^* + d_i^-}, \qquad i = 1,2,\dots,m \quad (30)$$

Onde:

CC_i representa o coeficiente de proximidade da alternativa “i”, representado por um valor entre 0 e 1;

d^*_i representa a distância calculada entre a alternativa “i” e a solução positiva ideal (FPIS);

d^-_i representa a distância calculada entre a alternativa “i” e a solução negativa ideal (FNIS);

A ordem de preferência das alternativas é estabelecida através da classificação de acordo com o valor calculado para o coeficiente de proximidade de cada alternativa em ordem descendente, em que a melhor alternativa é aquela cujo valor mais se aproxima de um.

2.4. O Problema da Mochila

O problema da mochila é um problema de otimização combinatória cujo objetivo é preencher uma ou mais mochilas com um determinado conjunto de objetos, de diferentes pesos e valores, de maneira que se tenha no interior da mochila o maior valor possível, respeitando-se o limite máximo de peso suportado por ela.

A combinação binária dos projetos que farão parte ou não de uma determinada carteira de investimentos pode ser facilmente formulada nos termos do problema da mochila.

Matematicamente, o problema da mochila pode ser formulado através da maximização da função objetivo representada na equação 31, submetida às restrições apresentadas nas equações 32 e 33.

$$\sum_{i=1}^{n} v_i x_i \qquad (31)$$

$$\sum_{i=1}^{n} w_i x_i \leq W \quad (32)$$

$$0 \leq x_i \leq Q_i \qquad (33)$$

Onde:

v_i corresponde ao valor do item “i”;

x_i corresponde à quantidade de itens “i” contidos na mochila;

w_i corresponde ao peso do item “i”;

W corresponde à capacidade total da mochila

Q_i corresponde ao número de cópias disponíveis do item “i”;

Quando a quantidade de cópias disponíveis (Q_i) para um ou mais itens é infinita, o problema é dito como ilimitado. Caso haja uma quantidade limitada de itens para serem colocados na mochila, o problema é dito como limitado. O caso da seleção de uma carteira de projetos de investimentos se enquadra no caso da mochila 0-1 (também conhecido como caso da mochila booleana), um caso específico do problema da mochila limitada, em que há apenas uma cópia disponível de cada item ($Q_i = 1$). (PSINGER, 1995)

Embora o problema da mochila seja de simples formulação, sua resolução pode ser extremamente complexa. Se tomarmos como exemplo o caso do preenchimento de uma mochila booleana que possui “n” itens a sua disposição, ao final, o problema apresentará 2^n soluções possíveis, que deverão ser analisadas individualmente para se determinar qual delas apresenta o maior valor, respeitando o limite imposto pela capacidade da mochila. Ou seja, para um problema constituído de 10 objetos, há 1.024 soluções possíveis. Se o número de objetos for aumentado para 20, o número de soluções subirá para 1.048.576. Já para 50 objetos, há 1.125.899.906.842.620 possíveis combinações.

De uma maneira geral, há uma série de algoritmos que se propõem a resolver as mais diversas variações do problema da mochila, sejam eles projetados para gerar soluções ótimas, como os algoritmos baseados em programação dinâmica e *branch and bound* ou baseados em técnicas heurísticas, que apesar de reduzir em parte a qualidade da solução, já que não garantem que a solução encontrada seja ótima, permitem que o problema seja processado de uma maneira mais rápida e menos custosa.

Em se tratando dos algoritmos de solução exata, os menos sofisticados são os chamados “algoritmos de força bruta”. Nestes tipos de algoritmos, todas as soluções possíveis para o problema são enumeradas e comparadas de maneira exaustiva até que se possa identificar a melhor solução. Embora seja uma abordagem simples, ela se torna inviável para problemas de grande dimensão, uma vez que a complexidade deste algoritmo cresce exponencialmente à medida que se aumenta o número de objetos disponíveis. (HRISTAKEVA; SHRESTHA, 2005)

A técnica *branch and bound*, por sua vez, ao invés de estender uma solução parcial iterativamente até se chegar à solução global do problema, faz uma enumeração inteligente das possíveis soluções para o problema. Diferentemente da abordagem do tipo “força bruta”, apenas um subconjunto de soluções do problema é enumerado de maneira explícita. As soluções candidatas consideradas infrutíferas pelo método, que de antemão já se tem conhecimento que não podem conter a solução ótima para o problema, são descartadas em massa.

No pior caso, este tipo de abordagem pode apresentar complexidade exponencial, já que em tese, há a possibilidade de que não se consiga descartar nenhuma solução de maneira preliminar. Porém, a técnica *branch and bound* ainda é superior àquelas baseadas em “força bruta”, uma vez que dificilmente o método precisará gerar todas as soluções possíveis. (HRISTAKEVA; SHRESTHA, 2005)

Em se tratando de técnicas heurísticas, as mais utilizadas são as baseadas em algoritmo guloso e em procedimentos evolucionários como os algoritmos genéticos.

3. Metodologia de Pesquisa

A metodologia adotada nesta pesquisa foi a modelagem quantitativa, um tipo bastante comum nos estudos acadêmicos envolvendo Engenharia de Produção e Gestão de Operações, especialmente no campo da pesquisa operacional, que segundo Arenales et al. (2007), é a área do conhecimento dedicada ao estudo dos processos de tomada de decisões em condições que requerem a alocação eficiente de recursos escassos.

Desde o aparecimento da pesquisa operacional como campo de estudo, inicialmente na Europa e posteriormente nos Estados Unidos, a modelagem quantitativa vem sendo utilizada como a principal abordagem metodológica de pesquisa nesta área. Quando surgiu, a pesquisa operacional era essencialmente orientada para a resolução dos problemas práticos do dia a dia. Poucas pesquisas eram desenvolvidas com o intuito de se avançar no conhecimento científico. Apenas na década de 1960, especialmente nos Estados Unidos, é que uma linha de pesquisa acadêmica bastante sólida se desenvolveu trabalhando em problemas mais idealizados, deixando de lado as pesquisas de cunho empírico e desenvolvendo os principais métodos de solução de problemas de pesquisa operacional utilizados até hoje. A partir da década de 1990, esta tendência novamente se reverteu e a necessidade de desenvolvimento de teorias explanatórias e preditivas relacionadas à pesquisa operacional se mostrou mais aparente. (BERTRAND; FRANSOO, 2002)

Cabe-se fazer uma menção ao destaque dado por Fillipini (1997) à pesquisa empírica, ao afirmar que esta representa um importante papel para o desenvolvimento teórico e do conhecimento nas áreas de Gestão de Operações ao servir com ponte entre a pesquisa acadêmica teórica e a prática aplicada no dia a dia das empresas.

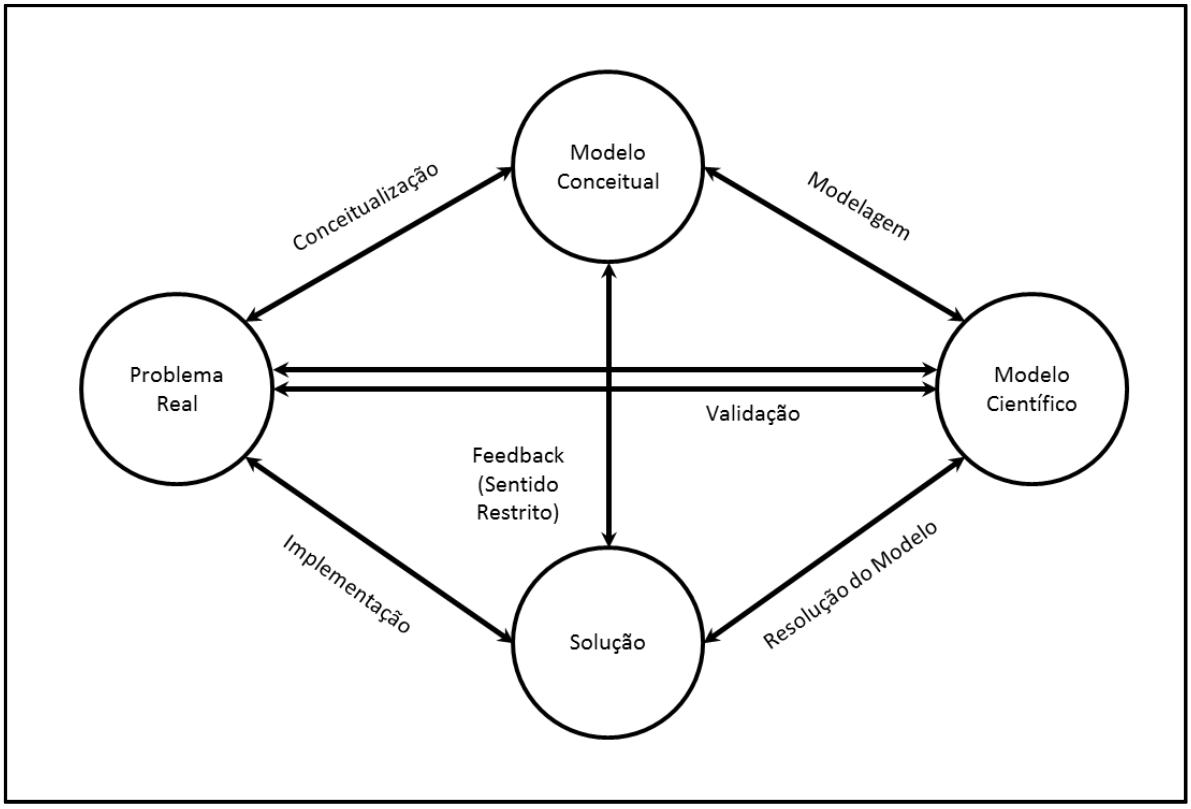
Já a modelagem quantitativa, sua principal abordagem metodológica, trata de representar uma situação ou realidade, conforme vista por uma pessoa ou um grupo de pessoas, e construí-la de modo a auxiliar a análise daquela situação de uma forma sistemática, baseando-se na ideia de que é possível se construir modelos objetivos que consigam explicar (pelo menos uma parte) do comportamento de processos operacionais reais o consigam capturar (pelo menos em parte também)

os problemas de tomada de decisão enfrentados pelas empresas. (BERTRAND; FRANSOO, 2002)

Se por um lado um modelo deve ser suficientemente detalhado para representar com exatidão a situação real à qual ele pretende modelar, por outro ele deve ser razoavelmente simples para poder ser compreendido, tratado e manipulado. (MORABITO; PUREZA, 2010)

A elaboração do modelo quantitativo de suporte à tomada de decisão na análise, priorização e seleção de projetos de investimentos nas refinarias de petróleo brasileiras, escopo deste projeto de pesquisa, foi feita seguindo-se a metodologia sugerida por Mitroff et al. (1974), apresentada na figura 13.

Figura 13 – Visão sistemática do processo de elaboração de um modelo quantitativo.



Fonte: Mitroff et al. (1974).

A primeira etapa proposta pela metodologia de Mitroff et al. (1974) é a conceitualização. Nesta etapa, o modelo conceitual do problema ou sistema em estudo é elaborado, escolhendo-se as variáveis que serão utilizadas pelo modelo, e a abrangência tanto do modelo quanto do problema de pesquisa. Para Morabito e

Pureza (2010) esta etapa consiste de uma descrição verbal e qualitativa na qual apenas uma parte das variáveis que definem o comportamento do sistema é considerada.

A segunda etapa da metodologia de Mitroff et al. (1974) é a da modelagem propriamente dita. É nesta fase que o modelo quantitativo é construído e as relações causais entre as variáveis selecionadas na etapa anterior serão estabelecidas.

A terceira etapa é a resolução do modelo elaborado na fase anterior. É nesta etapa em que as ferramentas matemáticas desempenham o papel mais importante e são utilizadas de maneira mais intensa.

Finalmente, a quarta etapa da metodologia de Mitroff et al. (1974) é a implementação. Nesta etapa, os resultados obtidos são analisados e utilizados como ferramenta de suporte ao processo decisório.

Cabe-se ressaltar ainda que Mitroff et al. (1974) alertam para o fato de que, embora haja alguns atalhos neste processo, eles são indesejáveis. Um dos atalhos mencionados pelos autores é aquele formado pelo ciclo que sai do modelo conceitual, passa pelo modelo científico e retorna ao modelo conceitual, assumindo que a resolução do problema é meramente uma questão iterativa para se chegar a um modelo científico melhor e mais robusto. A este atalho, os autores dão o nome de feedback no sentido restrito, indicando duas vulnerabilidades associadas a este ciclo. A primeira é que ele não retorna à realidade para questionar se as premissas inicialmente adotadas na elaboração do modelo conceitual estão corretas. A segunda vulnerabilidade é que este tipo de abordagem científica não se preocupa com a etapa de implementação, relevando os impactos e implicações que ocorrem no ambiente da prática.

Outro atalho citado pelos autores é aquele formado pelo ciclo que sai do problema real, passa pelo modelo conceitual, segue diretamente para a solução e retorna ao modelo conceitual. Se o primeiro caso representa uma preocupação excessiva com as atividades de modelagem e solução, este representa uma preocupação excessiva com as etapas de conceitualização e implementação. As atividades de conceitualização e modelagem se confundem. Segundo os autores, por mais detalhada e rica que seja a conceitualização, ela não deve substituir a modelagem

formal. Da mesma maneira, por mais significativa que uma determinada solução possa ser, ela não deve substituir a etapa de implementação.

Segundo Bertrand e Fransoo (2002), a relevância científica da pesquisa envolvendo a modelagem quantitativa é determinada principalmente por aquilo que ela pretende contribuir com a literatura existente. São distinguidos dois tipos de contribuição. O primeiro é o estudo de uma nova variante de um processo ou problema, utilizando-se de técnicas conhecidas de solução. O segundo tipo de contribuição é aquela feita para estudar um processo ou um problema que já havia sido estudado anteriormente, mas que fornece uma nova solução seja através da aplicação de novas técnicas, ou através do alcance de melhores resultados com técnicas de solução normalmente aceitas.

A contribuição teórica que este estudo pretende fornecer para a literatura acadêmica existente certamente se encaixa no segundo tipo descrito acima. Através da aplicação de uma nova técnica para a análise, priorização e seleção de projetos de investimentos no setor de refino de petróleo, pretende-se elaborar uma metodologia de análise mais robusta, complementando as análises fornecidas pelos métodos tradicionalmente aceitos para a avaliação de projetos de investimentos.

4. Proposta de Modelo de Análise

O modelo teórico quantitativo objeto deste projeto de pesquisa foi desenvolvido procurando-se seguir a metodologia sugerida por Mitroff et al. (1974).

A primeira parte desta seção refere-se à identificação e estruturação do problema de decisão, em que a problemática é apresentada e o problema de decisão é equacionado. No esquema de Mitroff et al. (1974), esta etapa corresponde à fase de conceitualização.

A segunda parte corresponde ao desenvolvimento do modelo teórico, ou à segunda etapa na metodologia de Mitroff et al. (1974). Utilizando-se a de uma metodologia baseada em Fuzzy TOPSIS, o modelo inicialmente prioriza a carteira de projetos de investimentos em análise para em um segundo momento selecionar aqueles projetos que em conjunto oferecem o máximo benefício global para a empresa. Para a fase de seleção, o modelo utiliza uma abordagem baseada em um algoritmo exato de programação inteira do tipo *branch and bound*.

Por fim, a terceira parte trata das fases de resolução e implementação do modelo. É nesta fase que o modelo é testado em uma carteira de projetos candidatos à execução em uma refinaria de petróleo brasileira.

Embora haja uma clara preferência na literatura acadêmica pela utilização do AHP de Saaty, este projeto optou por uma abordagem baseada em TOPSIS durante a etapa de priorização, em razão da grande quantidade de critérios de avaliação envolvidos, da quantidade de avaliadores e do número de alternativas disponíveis que acabaram caracterizando o problema de pesquisa.

Já na etapa de seleção, optou-se pela utilização de um algoritmo exato do tipo *branch and bound* já que, na maior parte dos casos, os problemas não são tão simples para serem resolvidos por um algoritmo do tipo “força bruta” e nem tão complexos ao ponto de haver a necessidade de se recorrer a um algoritmo aproximado que sacrificaria a qualidade da solução.

O modelo adotou também como premissa simplificadora que os projetos de investimentos não são divisíveis, ou seja, o tomador de decisão não tem a flexibilidade de selecionar nenhum projeto de forma parcial.

Embora esta premissa não seja sempre verdadeira, uma vez que na prática há a possibilidade de se realizar parte do investimento no ano corrente e parte em um momento posterior, ela se apresentou como uma boa aproximação. Os projetos de melhorias operacionais nas refinarias de petróleo brasileiras, em sua maioria, possuem prazos de implementação relativamente curtos, normalmente inferiores a um ano e se aproveitam das janelas criadas pelas paradas de manutenção das unidades de processo para serem implementados, havendo na prática poucos projetos capazes de serem implementados em mais de uma etapa.

Além disso, do ponto de vista estritamente matemático, o problema da mochila booleana é muito mais difícil de ser resolvido que o problema da mochila fracionária. Seria muito mais fácil adaptar o modelo desenvolvido neste trabalho para se resolver um problema em que os projetos são perfeitamente divisíveis do que o contrário.

4.1. Identificação e Estruturação do Problema de Decisão

O processo de tomada de decisão envolvendo a priorização e a seleção de projetos de investimentos na indústria do petróleo está longe de ser uma tarefa trivial.

Ao mesmo tempo em que se deve buscar a seleção daqueles projetos cujas relações entre risco e retorno sejam as mais favoráveis possíveis, nas últimas décadas a indústria petrolífera também vêm sendo cobrada pela adoção de uma postura cada vez mais ética e responsável em seus negócios, alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável.

Um levantamento público realizado nos Estados Unidos no ano de 1999 indicou que apenas um terço dos americanos bem informados tinha opinião favorável sobre a indústria química em geral. Na Alemanha, em 2000, 31% dos pesquisados julgava que a indústria química faz muito pouco ou nada para reduzir os efeitos danosos de suas atividades sobre o meio ambiente. Na Inglaterra, também em 2000, só 21% dos pesquisados se disse favorável à indústria química. No Brasil, pesquisa feita com a população da Bahia em 2000 indicou que 59,5%, julgam que as empresas do polo petroquímico de Camaçari são inseguras. (WONGTCHOWSKI, 2002)

Embora o levantamento englobe a indústria química como um todo, e não apenas a indústria petrolífera, na chamada economia do conhecimento, em que os ativos intangíveis, como a marca e a reputação de uma empresa, adquirem uma importância estratégica cada vez maior para os negócios, o estudo faz um importante alerta ao indicar uma imagem deteriorada das empresas do setor perante a opinião pública no final do século XX.

No caso da indústria petrolífera, mais especificamente, esta preocupação é ainda mais acentuada. Além de consumir um recurso não renovável, suas atividades provocam impactos nos ecossistemas em que atuam, emitem compostos poluentes e historicamente são responsáveis por causar acidentes ambientais de grandes proporções.

O que se percebe de fato é que, embora não se consiga mensurar de maneira adequada os custos e os benefícios de se adotar uma postura sustentável, a indústria vem tentando se mobilizar cada vez mais nesta direção, investindo em fontes de energia renovável e estabelecendo metas agressivas de redução de emissões de gases que contribuem para o aquecimento global, na tentativa de mudar sua imagem desgastada por décadas na liderança da emissão destes gases. (VINHA, 2010)

Segundo as palavras de Vinha (2010, p. 183), "*raro é encontrar, hoje, uma empresa disposta a ostentar o nome de sua principal atividade. Todas querem ser reconhecidas, principalmente, como empresas de energia.*"

Ou seja, hoje cada vez mais estas empresas compreendem que o custo financeiro e a perda de reputação (*goodwill*) associados ao passivo ambiental são mais altos que os investimentos feitos em meio ambiente, pois influenciam na opinião pública e dificultam a implementação de novos projetos e a renovação de contratos.

Em se tratando mais especificamente do caso da indústria petrolífera brasileira esta tarefa se torna ainda mais complexa. Segundo levantamento estatístico da ANP (2013), durante o ano de 2012 a Petrobras foi responsável direta pela produção de 92% do petróleo produzido em território brasileiro. Em se tratando de capacidade de refino, o domínio da empresa sobre a atividade é ainda maior. Suas refinarias respondem por 98% da capacidade total de processamento de petróleo no Brasil.

Ou seja, embora o regime de monopólio da atividade petrolífera brasileira tenha sido oficialmente extinto em 1997, na prática ele permanece.

E sendo a Petrobras uma empresa de capital predominantemente estatal, não pode deixar de considerar na análise de seus investimentos seu papel como agente econômico impulsionador do desenvolvimento nacional, realizando investimentos que muitas vezes a iniciativa privada não tem interesse, capacidade de fazer ou simplesmente não consegue realiza-los devido à existência de barreiras de entrada.

Mesmo considerando que, como qualquer outra empresa, a Petrobras tenha que ser competitiva do ponto de vista econômico, há uma série de outros interesses de Estado que vinculam o seu negócio à implementação de políticas públicas, como a necessidade de garantir o abastecimento do Brasil por petróleo e derivados, a proteção ao meio ambiente, a geração de empregos, o crescimento da indústria, o desenvolvimento e a nacionalização de novas tecnologias, a atração de investimentos para o Brasil e a ampliação da receita tributária dirigida para programas sociais. (ARAÚJO, 1996)

Portanto, neste cenário, em que se exige a ponderação de objetivos tão diversos e muitas vezes conflitantes entre si, a priorização e a seleção de uma carteira de projetos de investimentos pode se tornar uma tarefa extremamente complexa. O conjunto de ferramentas tradicionais de análise de investimentos, objeto de estudo da Engenharia Econômica, lidam apenas com as grandezas econômicas relacionadas ao investimento, não considerando (ou considerando de maneira inadequada) todas as outras variáveis envolvidas no processo, muitas vezes colocadas de maneira qualitativa e de difícil mensuração. A multiplicidade de interesses legítimos em jogo é tão grande, que a formação de uma unidade monetária comum de comparação é impossível de ser obtida.

Embora seja de simples estruturação, o problema de decisão é complexo.

O problema da priorização é equacionado através de uma matriz decisão, semelhante à apresentada na tabela 2. Nesta matriz, as alternativas de decisão estão representadas nas linhas, enquanto que as colunas representam os critérios de análise. O cruzamento de cada linha com cada coluna representa o valor da avaliação de cada alternativa sob a ótica de cada um dos critérios.

Posteriormente, estes valores são agregados de tal maneira que se gere uma pontuação para cada alternativa baseada no seu alinhamento com os critérios de análise.

Alternativas	**Critérios**				
	C_1	**C_2**	**C_3**	**...**	**C_m**
A_1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	…	x_{1m}
A_2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	…	x_{2m}
A_3	x_{31}	x_{32}	x_{33}	…	x_{3m}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
A_n	x_{n1}	x_{n2}	x_{n3}	…	x_{nm}
W (peso)	w_1	w_2	w_3	…	w_m

Tabela 2 - Tabela de informações para o problema da priorização envolvendo alternativas de investimentos.

Já a etapa de seleção é solucionada através de um algoritmo que maximiza a função objetivo representada pela equação 34 e respeitando a restrição orçamentária representada pela equação 35.

$$\sum_{i=1}^{n} v_i x_i \qquad (34)$$

$$\sum_{i=1}^{n} w_i x_i \leq W \quad (35)$$

Onde:

v_i corresponde à pontuação obtida pelo projeto “i”;

x_i corresponde a uma variável booleana, que assume o valor de 0 ou 1;

w_i corresponde ao valor do investimento previsto para o projeto “i”;

W corresponde ao orçamento total disponibilizado para a execução dos projetos.

4.2. Elaboração do Modelo

Conforme abordado anteriormente, o modelo proposto é dividido em duas etapas.

A primeira etapa é a priorização dos investimentos em análise. Nesta etapa, uma lista de propostas de projetos de investimentos é apresentada. Sob a perspectiva de critérios de avaliação previamente determinados, cada proposta é analisada individualmente, de maneira que ao final se consiga classificá-las de acordo com a sua importância.

A segunda etapa é a seleção dos projetos que farão parte da carteira de investimentos, considerando-se a existência de um orçamento limitado que impede que todos os projetos priorizados na etapa anterior sejam executados. Nesta etapa busca-se selecionar aqueles projetos que em conjunto consigam trazer o maior benefício global para a empresa.

4.2.1. Priorização dos Projetos de Investimentos

No modelo proposto por este projeto de pesquisa, a etapa de priorização dos projetos de investimentos é feita através de uma abordagem baseada na metodologia Fuzzy TOPSIS.

Nesta etapa, tanto a atribuição de pesos aos critérios de avaliação quanto a avaliação das alternativas é feita através do uso variáveis linguísticas. Estas variáveis, por sua vez, são convertidas em um segundo momento em valores numéricos através dos números fuzzy triangulares.

A tabela 3, extraída de Chen (2000), apresenta os valores de conversão das variáveis linguísticas utilizadas para ponderação dos critérios de decisão em números fuzzy triangulares.

Variável Linguística	Número Fuzzy Correspondente
Muito Baixa	(0,0,0.1)
Baixa	(0,0.1,0.3)
Média Baixa	(0.1,0.3,0.5)
Média	(0.3,0.5,0.7)
Média Alta	(0.5,0.7,0.9)
Alta	(0.7,0.9,1.0)
Muito Alta	(0.9,1.0,1.0)

Tabela 3 – Tabela de conversão das variáveis linguísticas utilizadas para ponderação dos critérios de decisão em números fuzzy triangulares. Adaptado de Chen (2000).

Por sua vez, a tabela 4, também extraída de Chen (2000), converte em números fuzzy triangulares as variáveis linguísticas utilizadas para avaliação das alternativas de decisão.

Variável Linguística	Número Fuzzy Correspondente
Muito Ruim	(0,0,1)
Ruim	(0,1,3)
Médio Ruim	(1,3,5)
Médio	(3,5,7)
Médio Bom	(5,7,9)
Bom	(7,9,10)
Muito Bom	(9,10,10)

Tabela 4 – Tabela de conversão das variáveis linguísticas utilizadas para avaliação das alternativas de decisão em números fuzzy triangulares. Adaptado de Chen (2000).

Assumindo-se que o comitê responsável para estudar o problema seja composto por K membros, a importância de cada critério e a avaliação de cada alternativa é calculada através das equações 36 e 37:

$$w_j = \frac{1}{K}\left[w_j^1 + w_j^2 + \cdots + w_j^K\right] \quad (36)$$

$$x_{ij} = \frac{1}{K}\left[x_{ij}^{1} + x_{ij}^{2} + \cdots + x_{ij}^{K}\right] \quad (37)$$

Onde:

x^K_{ij} e w^K_j são respectivamente as avaliações de cada alternativa e o peso de cada critério em relação ao avaliador K.

Em seguida, procede-se com a normalização das avaliações obtidas para cada alternativa de decisão através da seguinte transformação linear escalar:

$$r_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*}\right), j \in B \qquad (38)$$

$$r_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}}\right), j \in C \qquad (39)$$

Onde:

(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}) representa o número fuzzy gerado pela avaliação alternativa “i” (x_{ij}) sob a ótica do critério de avaliação “j”.

r_{ij} representa a avaliação normalizada da alternativa “i” sob a ótica do critério de avaliação “j”.

B representa os critérios de benefício;

c^*_j representa o máximo valor de c_{ij} em i se j pertence à B;

C representa os critérios de custo;

a^-_j representa o mínimo valor de a_{ij} em i se j pertence à C;

Como os critérios possuem pesos diferentes, a etapa seguinte é a construção da matriz de decisão normalizada e ponderada, dada pelas equações 40 e 41.

$$V = [v_{ij}]_{m \times n}, \qquad i = 1,2, \dots, m, \qquad j = 1,2, \dots, n \qquad (40)$$

$$v_{ij} = r_{ij}.w_j \qquad (41)$$

Onde:

v_{ij} representa a avaliação normalizada e ponderada da alternativa “i” sob a ótica do critério de avaliação “j”.

r_{ij} representa a avaliação normalizada da alternativa “i” sob a ótica do critério de avaliação “j”.

w_j representa o peso relativo do critério de avaliação “j”.

Em seguida, define-se a solução positiva ideal (FPIS) e a solução negativa ideal (FNIS) através das equações 42 e 43.

$$FPIS = \left(v_1^*, v_2^*, \dots, v_j^*, \dots v_n^*\right) \qquad (42)$$

$$FNIS = \left(v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots v_n^-\right) \qquad (43)$$

Onde:

$v^*_1, v^*_2, \dots, v^*_j, \dots, v^*_n$ são iguais ao número fuzzy (1,1,1)

$v^-_1, v^-_2, \dots, v^-_j, \dots, v^-_n$ são iguais ao número fuzzy (0,0,0)

A distância entre cada alternativa de FPIS e FNIS é calculada pelas equações 44 e 45.

$$d_i^* = \sum_{j=1}^{n} d\left(v_{ij}, v_j^*\right), \qquad i = 1,2, \dots m \qquad (44)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^{n} d\left(v_{ij}, v_j^-\right), \qquad i = 1,2, \dots m \qquad (45)$$

Onde:

v_{ij} representa a avaliação normalizada e ponderada da alternativa “i” sob a ótica do critério de avaliação “j”;

v^*_j é a solução positiva ideal em relação ao critério “j” e igual ao número fuzzy (1,1,1);

v^-_j é a solução negativa ideal em relação ao critério “j” e igual ao número fuzzy (0,0,0);

d^*_i representa a distância calculada entre a alternativa “i” e a solução positiva ideal (FPIS);

d^-_i representa a distância calculada entre a alternativa “i” e a solução negativa ideal (FNIS);

Finalmente, o coeficiente de proximidade é determinado para cada alternativa para se estabelecer a ordem de preferência entre elas (equação 46).

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^* + d_i^-}, \qquad i = 1,2, \dots, m \qquad (46)$$

Onde:

CC_i representa o coeficiente de proximidade da alternativa “i”, representado por um valor entre 0 e 1;

d^*_i representa a distância calculada entre a alternativa “i” e a solução positiva ideal (FPIS);

d^-_i representa a distância calculada entre a alternativa “i” e a solução negativa ideal (FNIS);

4.2.2. Seleção dos Projetos de Investimentos

Para a etapa de seleção dos projetos de investimentos priorizados na etapa anterior se propõe a utilização de um algoritmo de programação inteira do tipo *branch and bound*, similar ao proposto por Kolesar (1967), que resolve de maneira exata o problema da mochila booleana.

De uma maneira geral, os algoritmos do tipo *branch and bound* são largamente utilizados no auxílio à solução de problemas de otimização combinatória de grandes proporções, como aqueles envolvendo roteamento de veículos, em que se deseja atender a um determinado conjunto de consumidores, minimizando custos de transporte e distâncias percorridas, ou na programação de tripulações de uma companhia aérea, em que o objetivo é reduzir os custos de tripulação, respeitando-se restrições impostas por agências de regulação e leis trabalhistas, ou nos mais diversos tipos de problemas envolvendo planejamento e programação de produção.

Essencialmente, estes algoritmos fazem uma enumeração inteligente de apenas parte das possíveis soluções do problema, descartando em massa aquelas soluções candidatas consideradas infrutíferas, que de antemão já se tem conhecimento que não podem conter a solução ótima para o problema.

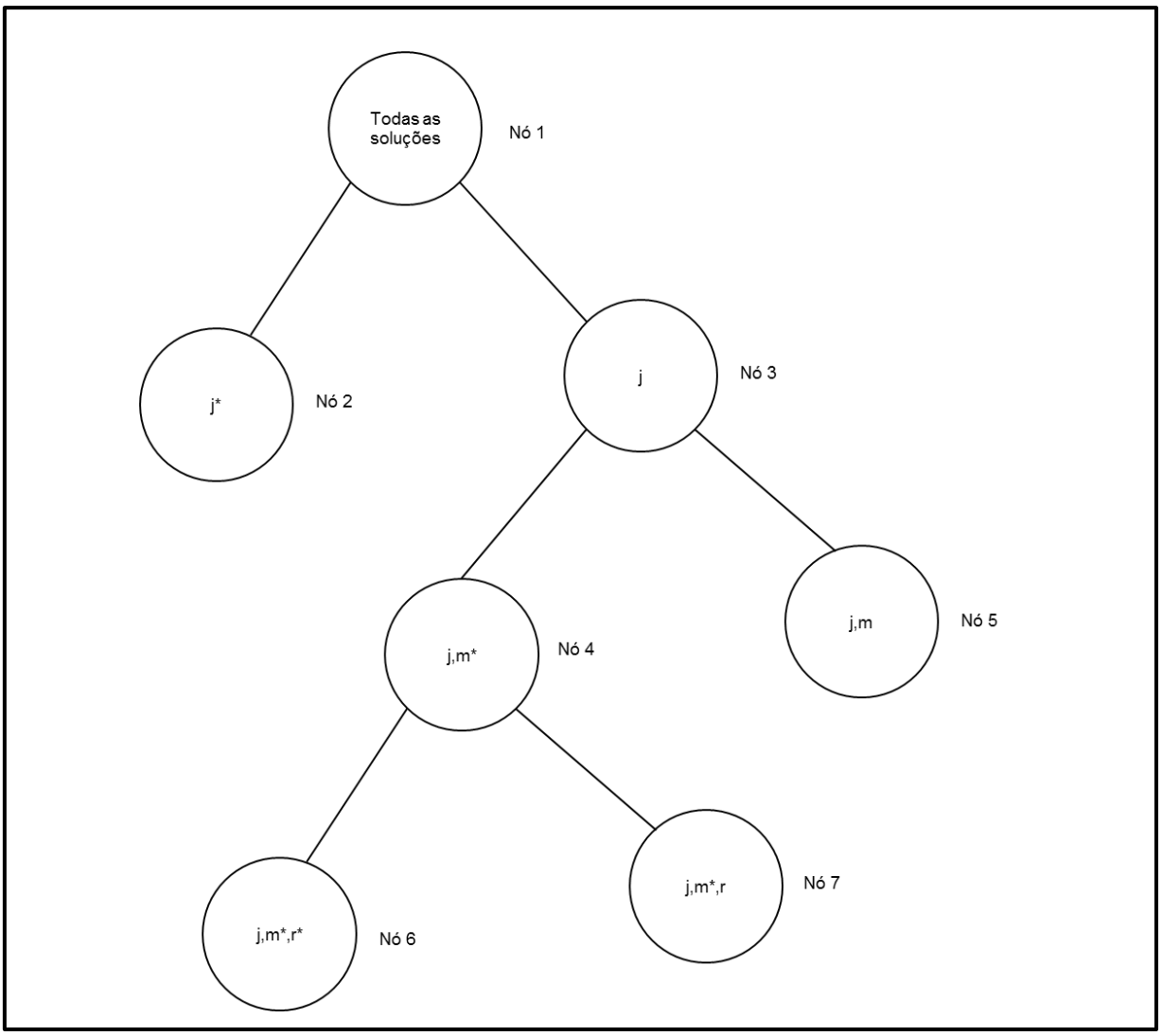
No pior caso, este tipo de abordagem apresenta complexidade exponencial, já que em tese, há a possibilidade de que não se consiga descartar nenhuma solução de maneira preliminar. Porém, a técnica *branch and bound* ainda é superior àquelas baseadas em “força bruta”, uma vez que dificilmente o método precisará gerar todas as soluções possíveis. (HRISTAKEVA; SHRESTHA, 2005)

O algoritmo proposto por Kolesar (1967), mais especificamente, parte inicialmente de um conjunto contendo todas as soluções viáveis para o problema denominado de nó inicial. Seguindo-se regras pré-estabelecidas de ramificação das soluções mais promissoras (branch) e podagem das soluções infrutíferas (bound) este nó vai se ramificando em novos nós contendo um número cada vez menor de soluções

viáveis, de maneira que, em última instância, o algoritmo convergirá para um único nó contendo a solução ótima do problema.

A operacionalização do algoritmo pode ser mais facilmente visualizada através da árvore mostrada na figura 14.

Figura 14 - Árvore de ramificação (branch) e poda (bound) de um algoritmo *branch and bound* típico.



Fonte: Kolesar (1967).

Os nós são representados por números (n = 1,2,3...), que são atribuídos a eles na ordem exata em que são gerados pelo algoritmo.

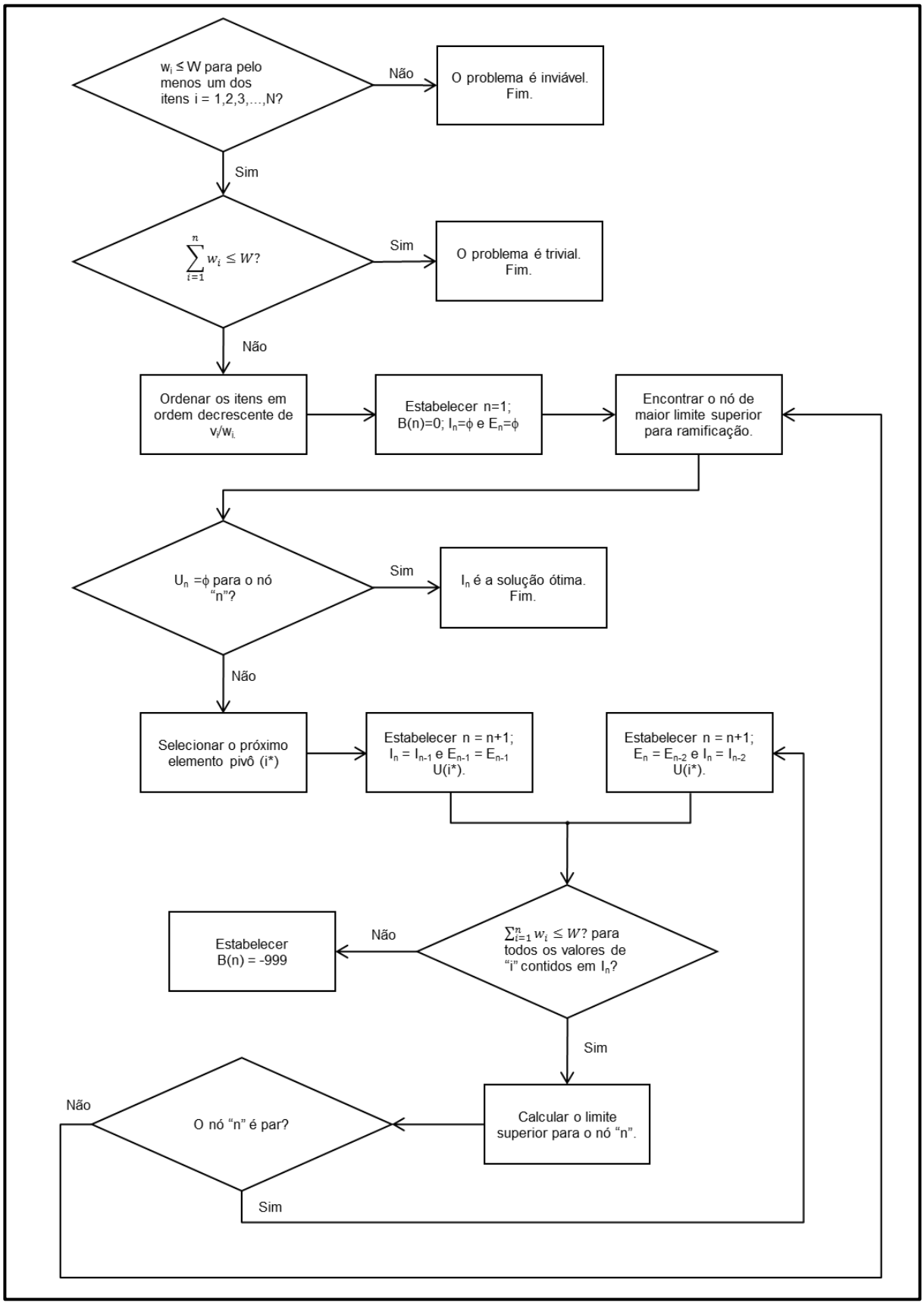
Cada nó da árvore pode ser entendido como um subconjunto de soluções para o problema, que lista explicitamente todos os itens que estão incluídos e todos os itens que estão excluídos das soluções contidas no nó. Portanto, cada nó “n” pode ser

caracterizado através do conjunto dos itens que estão explicitamente incluídos nas soluções (denominado I_n), do conjunto dos itens que estão explicitamente excluídos das soluções (denominado E_n) e pelo conjunto dos itens que ainda não foram atribuídos nem a I_n e nem a E_n, (denominado U_n). Quando este último conjunto é vazio para um determinado nó, conclui-se que ele contém uma única solução e o processo de ramificação a partir deste nó não se torna mais possível.

Tomando como exemplo a árvore apresentada na figura 14, o nó 1 representa a classe de todas as soluções para o problema. Já o nó 2 representa todas as soluções que excluem o item j, enquanto que o nó 3 representa todas as soluções que incluem o item j. Por fim, o nó 7 representa todas as soluções que contêm j e r mas não contém m.

Sendo B(n) a representação para o cálculo do limite superior do nó “n”, a figura 15 ilustra de maneira gráfica como o algoritmo foi implementado para a solução do problema da seleção da carteira de projetos de investimento da refinaria de petróleo estudada.

Figura 15 - Fluxograma do algoritmo implementado para seleção de projetos de investimentos.



Fonte: Autor

O processo de ramificação a partir de um nó “n” se inicia com a escolha de um dos itens que ainda não foram atribuídos nem a I_n e nem a E_n. Em um dos nós descendentes, o item é explicitamente incluído, enquanto que no outro, o item é explicitamente excluído. Antes de se efetuar a ramificação nos nós descendentes, o algoritmo verifica se as soluções contidas nestes nós são viáveis, ou seja, se a somatória dos pesos dos itens explicitamente incluídos na solução não ultrapassa o limite de peso estabelecido para a mochila. Se o teste falhar, o nó é podado e não se ramifica mais. Caso contrário, o limite superior (upper bound) do nó é calculado.

O limite superior associado ao nó “n” é definido como a solução ótima obtida para o problema caso não houvesse a restrição de que os itens colocados à disposição são indivisíveis.

Para este novo problema, em que todos os itens são perfeitamente divisíveis, a solução ótima é obtida simplesmente calculando-se a razão v_i/w_i para cada um dos itens disponíveis, ordenando-os em ordem decrescente e carregando-os na mochila seguindo-se esta ordem até que o limite de peso seja atingido. Como o valor da solução ótima para este novo problema não pode ser inferior ao valor da solução ótima para o problema original, ela naturalmente representa um limite máximo ao problema original.

A operação de ramificação é feita a partir do nó gerado que apresente o maior limite superior. Em seguida, escolhe-se o próximo item a ser adicionado ao conjunto dos itens incluídos e ao conjunto dos itens excluídos, para cada um dos nós descendentes. Este novo item é denominado elemento pivô. Embora a lógica de escolha do elemento pivô seja arbitrária, para que o algoritmo convirja de forma mais rápida e eficiente, Kolesar (1967) recomenda que ela seja feita escolhendo-se o elemento pertencente a U_n que apresente o maior valor na relação v_i/w_i.

4.3. Aplicação do Modelo Teórico em um Caso Prático

O modelo matemático desenvolvido por este projeto de pesquisa foi aplicado na análise de uma carteira de projetos de investimentos candidatos à execução em uma refinaria de petróleo brasileira, com capacidade para processamento de aproximadamente 200.000 barris por dia de petróleo e com um perfil voltado para a produção de combustíveis.

As próximas subseções abordam de maneira detalhada o desenvolvimento desta aplicação.

4.3.1. Descrição do Processo Produtivo da Refinaria

A Agência Nacional do Petróleo (ANP), responsável pela regulação do setor no Brasil, define o refino de petróleo como “o conjunto de processos físicos e químicos que têm por objetivo transformá-lo em seus derivados”.

Essencialmente, há quatro tipos de processos em uma refinaria de petróleo. Os processos de separação, conversão, tratamento e os auxiliares, que combinados entre si formam o esquema de refino necessário para a produção dos derivados exigidos pelo mercado.

Os processos de separação são aqueles de natureza física em que se utiliza energia para separar o petróleo em suas frações mais básicas.

O principal processo de separação em uma refinaria é o de destilação que tem por objetivo a separação do petróleo em uma série de componentes por meio da diferença de temperatura de ebulição existente entre eles. O processo de destilação existe em todas as refinarias, independentemente do esquema de refino adotado.

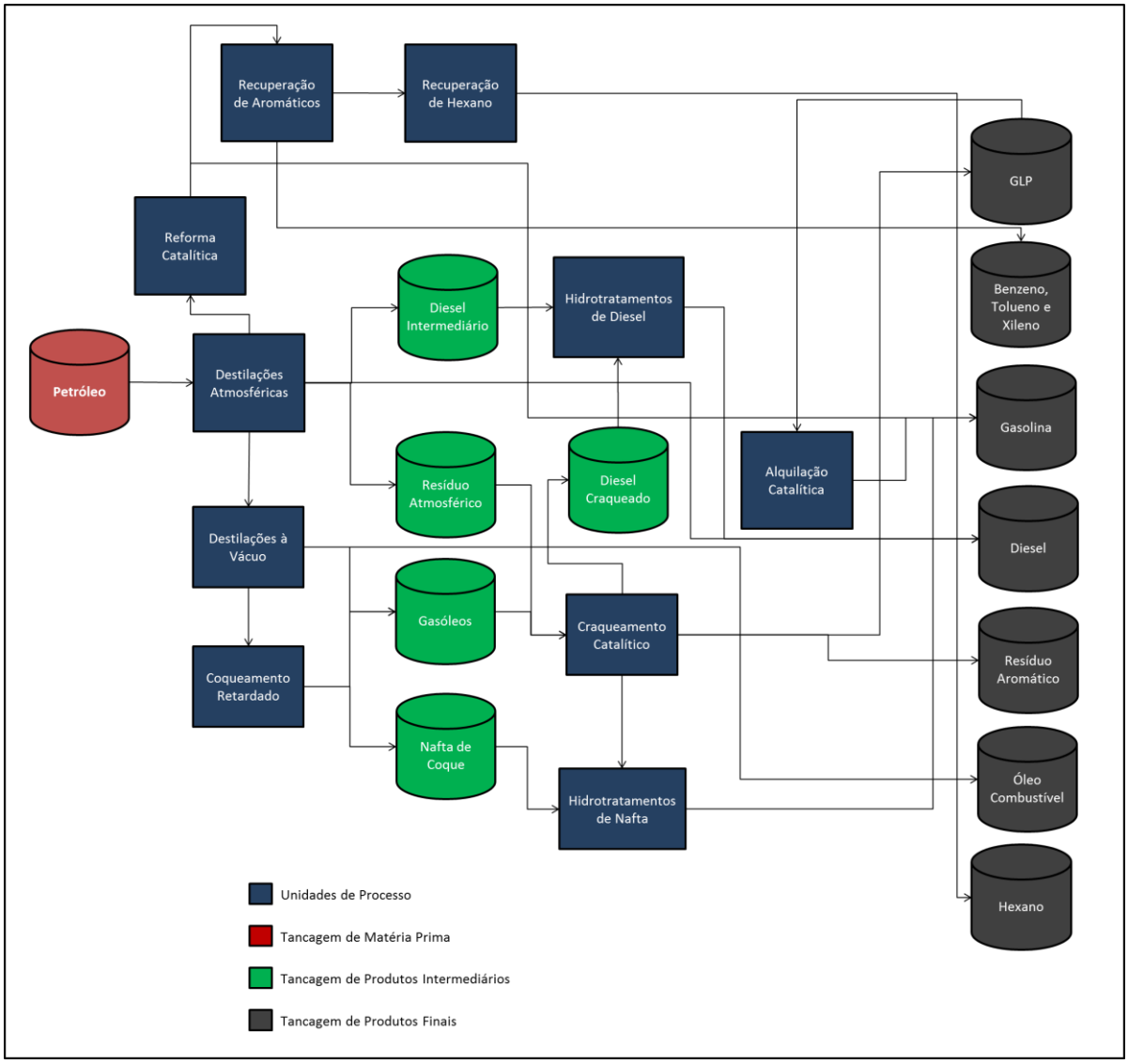
Os processos de conversão são os responsáveis por transformar quimicamente as características de uma fração de petróleo, através do reagrupamento ou quebra de suas moléculas. Normalmente, são processos de elevada rentabilidade, pois transformam frações de baixo valor agregado em frações mais nobres, como o gás liquefeito de petróleo (GLP), a gasolina ou o óleo diesel.

A finalidade dos processos de tratamento é a remoção de contaminantes presentes nas frações de petróleo. Os tipos de contaminantes presentes variam conforme o tipo de petróleo processado, sendo o principal contaminante o enxofre. A tendência é que se concentrem nas frações mais pesadas do petróleo, favorecendo a formação de compostos poluentes e, portanto, diminuindo a qualidade dos produtos.

Por fim, os processos auxiliares são aqueles que se destinam a fornecer insumos para os processos principais ou a tratar seus efluentes.

Na refinaria estudada, o petróleo chega através de um oleoduto, sendo armazenado em tanques específicos para posteriormente ser bombeado para as unidades de destilação da refinaria. A figura 16 mostra o fluxograma simplificado do processo produtivo da refinaria.

Figura 16 - Fluxograma simplificado do processo produtivo da refinaria estudada.



Fonte: Autor

Nas unidades de destilação (atmosférica e à vácuo) o petróleo é separado em uma série de frações básicas como a nafta leve, a nafta pesada, o querosene, o óleo diesel, o resíduo atmosférico (RAT), os gasóleos de vácuo e o resíduo de vácuo (RV).

A refinaria também possui uma unidade de craqueamento catalítico. Esta unidade recebe como “carga” os gasóleos de vácuo oriundos das destilações. Por meio de um processo de “quebra molecular”, a partir destas correntes, são produzidas frações mais leves e de maior valor agregado, como o gás liquefeito de petróleo

(GLP) e a nafta craqueada, que posteriormente será utilizada na formulação da gasolina.

A refinaria ainda possui duas unidades de coqueamento retardado, que convertem o resíduo de vácuo das destilações em frações mais nobres como a nafta de coque e os gasóleos de coque. Estas correntes, após receberem os devidos tratamentos, são utilizadas na formulação da gasolina e do óleo diesel. O processo de coqueamento retardado gera ainda, como subproduto, o coque de petróleo, que é vendido para indústrias de alumínio que o utiliza como matéria prima na fabricação de eletrodos.

As unidades de hidrotratamento de nafta e diesel são responsáveis por remover quimicamente contaminantes como o enxofre e o nitrogênio, das correntes processadas especificando-as para venda. Esta remoção é feita através da inserção do gás hidrogênio que em contato com um catalisador e sob determinadas condições de temperatura e pressão, reagem com estes contaminantes removendo-os da estrutura molecular.

A unidade de reforma catalítica da refinaria é responsável pela conversão química de hidrocarbonetos naftênicos e parafínicos, presentes nas correntes de algumas naftas, em isoparafinas e aromáticos, elevando sua octanagem e melhorando as características antidetonantes destes componentes. Parte da corrente produzida nesta unidade é utilizada na formulação da gasolina e parte é enviada para a unidade de recuperação de aromáticos.

Na unidade de recuperação de aromáticos, são produzidos o benzeno, o tolueno e o xileno, que são vendidos a empresas do setor químico e petroquímico. O efluente da unidade de recuperação de aromáticos ainda é processado em uma segunda unidade responsável por extrair o hexano desta corrente. Este produto também é vendido a empresas do setor químico.

A refinaria ainda conta com uma central de utilidades, responsável por fornecer água, vapor, ar comprimido e energia elétrica ao processo produtivo e uma área de tancagem para armazenamento de matéria prima, produtos intermediários e produtos finais, além de pátios de bombas utilizadas para realizar as movimentações internas e externas destes produtos.

4.3.2. Descrição da Estrutura Organizacional da Refinaria

A estrutura organizacional da refinaria estudada neste projeto de pesquisa é semelhante à apresentada por Aulicino (2008). A refinaria é constituída por uma gerência geral e treze gerências funcionais que ficam subordinadas diretamente à gerência geral.

As gerências funcionais responsáveis por realizar atividades de execução e que possuem um grande número de profissionais ligado a elas, como os técnicos de operação e os técnicos de manutenção, são subdivididas em gerências setoriais, coordenações e supervisões.

A gerência de produção é a responsável pela execução, pelo planejamento e pela avaliação das atividades necessárias nas unidades de processo para garantir o pleno atendimento ao plano de produção da refinaria.

A gerência de segurança, meio ambiente e saúde (SMS) da refinaria é a responsável pela preservação da integridade física das pessoas e equipamentos, preservação do meio ambiente e atendimento às legislações vigentes e diretrizes relacionadas à área estabelecidas pela empresa.

A gerência de engenharia é responsável pela gestão e realização dos investimentos nas unidades existentes, desenvolvendo os empreendimentos em todas as suas fases, desde os estudos preliminares até o término da montagem e entrega à refinaria, visando promover a melhoria operacional da mesma, seja em relação à segurança, meio ambiente, qualidade de produtos ou rentabilidade.

A refinaria ainda conta com uma gerência de empreendimentos responsável por conduzir os projetos de grande porte da refinaria, como as grandes ampliações e a construção de novas unidades de processo.

A gerência de manutenção industrial é responsável por garantir a disponibilidade operacional das instalações industriais de maneira a atender as diretrizes de confiabilidade e manutenção estabelecidas pela sede da empresa.

A gerência de inspeção de equipamentos é responsável pela integridade física de todas as instalações industriais da refinaria, visando garantir a operação segura dos equipamentos estáticos, prevenir a ocorrência de falhas, aumentar a confiabilidade

da produção de derivados e contribuir para redução de custos de produção, atendendo a critérios técnicos de engenharia, normas e regulamentações legais.

A gerência de otimização é responsável pela programação da produção, pelo acompanhamento das unidades de processo e pela elaboração de propostas de melhorias no processo produtivo. A gerência também é responsável por garantir a qualidade dos produtos produzidos e por desenvolver e implementar novos negócios, buscando agregar o máximo valor à matéria prima e otimizar os resultados das unidades de produção.

A gerência de comercialização é a responsável pelo planejamento, pela gestão e pela avaliação das atividades de comercialização e pelo faturamento dos produtos vendidos pela refinaria, além de fazer toda a gestão do relacionamento com seus clientes.

A gerência de comunicação é responsável pelo planejamento, gestão e avaliação das atividades de comunicação empresarial e pelo relacionamento com empregados, clientes, comunidade, imprensa e poderes públicos.

A gerência de planejamento e controladoria é responsável pela coordenação, acompanhamento e assessoramento das atividades de gestão (planejamento estratégico, análises de custos e orçamentos, avaliação dos indicadores de desempenho e de gestão e estudos de rentabilidade) para todas as demais gerências da refinaria, visando maximizar seus resultados globais e aumentar sua participação nos resultados da empresa como um todo.

A gerência de suporte operacional é responsável pelo suprimento de bens, pela contratação de serviços, pela manutenção de áreas prediais e pela segurança patrimonial da refinaria, suportando as atividades que garantem a continuidade operacional e a confiabilidade dos ativos da refinaria.

A gerência de transferência e estocagem é a responsável pelo planejamento, gestão e controle das operações do parque de armazenamento e bombeio de petróleo, produtos intermediários e produtos finais. Além disso, também é responsável pelo tratamento dos efluentes e resíduos gerados no processo produtivo da refinaria.

A gerência de recursos humanos é responsável por planejar, controlar e executar atividades de recursos humanos como recrutamento, seleção, frequência, treinamento, relações sindicais, desenvolvimento de pessoal e promoção da

ambiência organizacional, além de coordenar as interfaces entre a refinaria e a sede da empresa, nos assuntos relativos à área.

Segundo o sistema de gestão da empresa, qualquer modificação nas áreas industriais ou mesmo nas áreas prediais da refinaria deve fazer parte de um projeto específico.

Eventualmente, qualquer funcionário da refinaria pode detectar uma oportunidade de melhoria e apresentá-la à sua gerência funcional, descrevendo sucintamente a mudança e a sua justificativa. A gerência do funcionário, por sua vez, avalia a proposta e define se ela está alinhada às diretrizes estratégicas da empresa, sendo responsável por realizar uma triagem preliminar das oportunidades de melhorias.

Em determinada época do ano, cada gerência funcional submete uma lista de propostas para novos projetos a uma comissão interna de avaliação de investimentos, formada pelo gerente geral e pelos treze gerentes funcionais da refinaria, responsável por consolidar e avaliar todas as propostas.

Os projetos então são avaliados, priorizados e selecionados considerando-se essencialmente os seguintes critérios desdobrados do plano estratégico da empresa para o plano de gestão da refinaria:

- Atratividade econômica e viabilidade financeira do projeto;

- Alinhamento ao plano estratégico da empresa;

- Alinhamento às diretrizes de segurança, meio ambiente e saúde definidas pela sede da empresa;

- Alinhamento às diretrizes de confiabilidade operacional também definidas pela sede da empresa;

- Complexidade técnica dos projetos e necessidade de recursos humanos demandados para sua implantação;

- Impactos sociais e geração de empregos na comunidade local.

4.3.3. Aplicação do Modelo

O modelo teórico desenvolvido ao longo da seção 4.2 deste trabalho foi aplicado na análise de quinze propostas para projetos de investimentos.

Inicialmente, o plano de pesquisa original pretendia entrevistar cada um dos catorze gestores que integravam a comissão responsável por priorizar e selecionar os projetos de investimentos da refinaria.

A primeira etapa desta entrevista consistiria de uma breve introdução ao modelo, abordando seus aspectos fundamentais, os dados de entrada necessários, a função do avaliador no processo e o resultado final esperado da sua aplicação. Em seguida partiria-se para as análises propriamente ditas em que cada gestor avaliaria a importância de cada critério de decisão extraído do plano de gestão da refinaria, com base nas variáveis linguísticas da tabela 3 e avaliariam as alternativas de decisão sob a ótica de cada critério, tomando como referência as variáveis linguísticas da tabela 4.

No entanto, em razão da dificuldade em se conciliar a agenda dos gestores com o prazo disponível para a execução desta etapa da pesquisa, optou-se por uma abordagem mais simplificada, entrevistando-se apenas três deles através do protocolo descrito no parágrafo anterior.

Vale destacar que apesar da redução ocorrida no número de avaliadores, a etapa de implementação não foi prejudicada, uma vez que o modelo não estipula um número mínimo ou máximo de avaliadores. O objetivo de observar o comportamento do modelo em uma situação real de tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios, escopo desta etapa da pesquisa, manteve-se preservado.

Por motivos de confidencialidade e preservação das informações fornecidas pela empresa, os valores apresentados nas próximas tabelas foram multiplicados por um fator aleatório.

A tabela 5 mostra de maneira resumida o escopo de cada um dos projetos submetidos a esta comissão. A tabela 6, por sua vez, resume os principais indicadores econômicos e financeiros destes projetos.

Considerou-se como taxa mínima de atratividade o custo médio ponderado de capital da Petrobras informado em BB INVESTIMENTOS (2013), no valor de 8,5% ao ano.

Código Identificador	Descritivo do Escopo do Projeto
P1	Realização de melhorias no sistema de fracionamento de uma das unidades de Coqueamento Retardado da refinaria com o objetivo de aumentar a produção de diesel da unidade e consequentemente da refinaria como um todo.
P2	Instalação de um dispositivo magnético capaz de remover contaminantes metálicos em corrente de slop (efluente de algumas unidades de processo composto por uma emulsão de óleo e água que é reprocessada nas unidades de destilação e craqueamento da refinaria). A intervenção visa melhorar o desempenho operacional das unidades de destilação e aumentar o tempo de vida útil dos catalisadores utilizados no processo de Craqueamento Catalítico.
P3	Instalação de um novo trecho de tubulação, e toda a infraestrutura necessária para viabilizar a alimentação da unidade de hidrotratamento da refinaria com um corte de nafta oriundo das unidades de destilação. O principal ganho do projeto é sustentar a capacidade de processamento da refinaria ao reduzir a formação excessiva de estoque de um produto intermediário. Além disso, o projeto reduz a formação de nafta petroquímica (produto de menor valor agregado) e aumenta a produção de gasolina.
P4	Implementar um sistema mais eficiente e confiável de alimentação de gás natural combustível em um dos fornos da unidade de geração de hidrogênio, utilizado no processo de hidrotratamento, aumentando a confiabilidade operacional do forno e do sistema como um todo.
P5	Adequar um equipamento responsável por converter o gás amoniacal gerado ao longo do processo produtivo da refinaria em nitrogênio gasoso antes que o mesmo seja lançado na atmosfera. A adequação proposta resultará em um melhor desempenho operacional e maior confiabilidade ao equipamento.
P6	Instalação de medidores do teor de compostos poluentes nas chaminés de alguns fornos da refinaria.
P7	Modernização do sistema de controle dos compressores e da rede de ar comprimido da refinaria para alimentação de instrumentos, ferramentas e equipamentos pneumáticos. O projeto visa o aumento da confiabilidade e do desempenho operacional do sistema.
P8	Novo sistema para injeção de corante em correntes de óleo diesel com alto teor de enxofre para atendimento a exigências feitas pela agência reguladora do setor.
P9	Substituição do material dos tubos dos fornos de uma das unidades de destilação da refinaria por um material mais resistente à corrosão.

Continua

Código Identificador	Descritivo do Escopo do Projeto
P10	Modificação nos reatores da unidade de hidrotratamento de diesel para possibilitar a produção de diesel com baixíssimo teor de enxofre na refinaria.
P11	Realização de melhorias no sistema de fracionamento da outra unidade de Coqueamento Retardado da refinaria com o objetivo de aumentar a produção de diesel da unidade e consequentemente da refinaria como um todo.
P12	Instalação de uma nova rede de tubulação para água de reposição das torres de resfriamento da refinaria para atender o aumento de demanda da refinaria, modernizar o sistema atualmente em operação e torná-lo mais confiável.
P13	Substituição do sistema de comando e controle das válvulas da estação de tratamento de água para processo da refinaria por um sistema mais moderno e confiável.
P14	Instalação de analisadores para monitoramento do efluente líquido tratado gerado ao longo do processo produtivo da refinaria.
P15	Troca das bombas de expedição de diesel de uma das unidades de destilação da refinaria para aumentar sua produção.

Tabela 5 – Tabela dos projetos de investimentos em avaliação pelo grupo gestor da refinaria.

Código Identificador	Valor Previsto para o Investimento (R$)	Valor Presente Líquido (R$)	Tempo de Retorno do Investimento (anos)	Taxa Interna de Retorno (%)	Classificação pela Taxa Interna de Retorno
P1	468.137	1.214.412	2,48	40%	9
P2	137.320	494.083	1,93	52%	7
P3	412.241	541.508	3,90	25%	13
P4	79.169	634.935	0,98	103%	4
P5	2.028.594	580.174	7,22	13%	14
P6	532.116	2.231.623	1,71	59%	5
P7	608.578	1.921.681	2,14	47%	8
P8	297.837	2.447.551	0,95	105%	3
P9	2.064.796	3.062.126	3,63	27%	12
P10	9.456.368	227.252.265	0,35	286%	1
P11	530.555	2.144.409	1,76	57%	6
P12	12.617.854	3.266.138	7,39	12%	15
P13	1.553.435	3.533.429	2,73	37%	11
P14	2.012.989	4.949.838	2,58	39%	10
P15	5.149.507	47.166.826	0,87	116%	2

Tabela 6 - Indicadores econômicos e financeiros dos projetos submetidos para análise.

A primeira etapa do processo de avaliação das alternativas de investimentos foi o estabelecimento da importância relativa de cada critério de decisão através da seguinte escala qualitativa de variáveis linguísticas:

A – Muito alta;

B – Alta;

C – Média alta;

D – Média;

E – Média baixa;

F – Baixa;

G – Muito baixa.

Os critérios considerados na análise são os mesmos mencionados na seção 4.3.2 deste trabalho, oriundos do desdobramento do plano estratégico da empresa para o plano de gestão da refinaria.

O resultado desta etapa é exibido na tabela 7.

Critério	**Importância Relativa**		
	Avaliador 1	Avaliador 2	Avaliador 3
C1 – Aumento da Confiabilidade Operacional da Refinaria	B	A	B
C2 – Alinhamento Estratégico	A	A	A
C3 – Desempenho Econômico	A	A	A
C4 – Desempenho em Questões Associadas à Meio Ambiente, Segurança e Saúde Ocupacional	A	A	B
C5 – Complexidade Técnica	E	E	D
C6 – Geração de Empregos e Aceitação pela Comunidade Local	C	D	B

Tabela 7 – Avaliação da importância relativa dos critérios de avaliação dos projetos feita pelos avaliadores do comitê.

A etapa seguinte foi a avaliação qualitativa de cada um dos quinze projetos sob a ótica de cada critério de decisão utilizando-se como referência a escala de variáveis linguísticas apresentadas abaixo.

A – Muito bom;

B – Bom;

C – Médio bom;

D – Médio;

E – Médio ruim;

F – Ruim;

G – Muito ruim.

O resultado desta avaliação encontra-se na tabela 8.

Código Identificador	C1	C2	C3	C4	C5	C6
P1	D/F/F	A/A/A	A/A/A	D/F/F	E/E/D	B/D/C
P2	B/B/C	C/C/C	A/A/A	C/C/C	D/B/A	C/D/F
P3	C/F/F	A/B/A	A/A/A	D/F/F	B/D/D	C/D/C
P4	A/A/B	D/B/D	A/A/A	C/D/C	D/B/D	D/D/D
P5	A/B/B	D/B/B	B/B/C	A/A/B	E/D/E	B/C/C
P6	C/F/F	C/A/B	A/A/A	A/A/A	B/B/A	C/D/E
P7	A/A/A	C/B/B	A/A/A	D/C/D	D/E/D	D/E/D

Continua

Código Identificador	C1	C2	C3	C4	C5	C6
P8	D/E/F	B/A/D	A/A/A	C/B/B	A/A/B	A/B/D
P9	A/A/A	D/B/B	A/A/B	D/C/B	E/F/E	E/B/C
P10	D/E/D	A/A/A	A/A/A	A/B/B	D/E/D	C/A/C
P11	D/F/F	A/A/A	A/A/B	D/F/F	E/E/D	B/D/C
P12	A/B/A	C/B/C	B/B/C	D/F/E	E/F/E	B/A/B
P13	A/A/B	C/C/C	A/A/A	D/F/E	B/D/D	D/D/E
P14	C/D/F	B/A/B	A/A/A	A/A/A	B/B/B	D/E/D
P15	C/B/B	A/A/A	A/A/A	D/F/F	F/F/D	B/A/B

Tabela 8 – Avaliação das propostas de projetos de investimentos feitas respectivamente pelos avaliadores 1, 2 e 3.

Seguindo-se o procedimento descrito na seção 4.2.1 deste trabalho, foram calculadas as distâncias existentes entre cada alternativa de decisão para a solução positiva ideal (FPIS) e para a solução negativa ideal (FNIS), obtendo-se o coeficiente de proximidade (CC) de cada uma delas. As tabelas geradas ao longo deste processo estão disponíveis para consulta no apêndice A deste trabalho.

Por fim, aplicando-se o algoritmo de seleção descrito na seção 4.2.2 deste trabalho e considerando-se que foi imposta pela sede da empresa uma restrição orçamentária de R$ 23.000.000,00, calculou-se a carteira ótima que maximiza a somatória dos coeficientes de proximidade de cada alternativa de decisão.

Os projetos aceitos estão representados abaixo na tabela 9 pela variável de decisão 1, enquanto que os projetos rejeitados são representados pela variável de decisão 0.

Código Identificador	Valor do Investimento (R$)	CC	Classificação Pelo Modelo	Classificação pela TIR	Variável de Decisão
P1	468.137	0,503	14	9	1
P2	137.320	0,596	7	7	1
P3	412.241	0,516	13	13	1
P4	79.169	0,591	9	4	1
P5	2.028.594	0,632	1	14	1
P6	532.116	0,602	5	5	1
P7	608.578	0,595	8	8	1
P8	297.837	0,598	6	3	1
P9	2.064.796	0,606	4	12	1
P10	9.456.368	0,629	2	1	1
P11	530.555	0,498	15	6	1
P12	12.617.854	0,559	11	15	0
P13	1.553.435	0,550	12	11	1
P14	2.012.989	0,618	3	10	1
P15	5.149.507	0,589	10	2	0
Total	**20.182.137**	**7,533**	**-**		**-**

Tabela 9 - Cálculo do coeficiente de proximidade (CC) , do ranking final de cada alternativa de decisão e da carteira ótima de investimentos.

Apenas para efeitos comparativos, os resultados obtidos pelo modelo foram comparados com os resultados que seriam obtidos caso optasse por se utilizar unicamente a taxa interna de retorno de cada projeto em análise como fator de decisão. Neste caso, os projetos seriam classificados de acordo com a sua atratividade econômica, sendo escolhidos aqueles mais rentáveis até que o limite orçamentário disponibilizado pela empresa fosse totalmente preenchido.

É importante destacar que embora este tipo de abordagem requisite a utilização de uma série de cuidados devido a todas as limitações e equívocos conceituais que foram discutidos na seção 2.2.2.1 deste trabalho, ela ainda é muito comum no meio empresarial.

O resultado desta abordagem se encontra na tabela 10.

Código Identificador	Valor do Investimento (R$)	CC	Classificação pelo Modelo Proposto	Classificação pela TIR	Variável de Decisão
P1	468.137	0,503	14	9	1
P2	137.320	0,596	7	7	1
P3	412.241	0,516	13	13	0
P4	79.169	0,591	9	4	1
P5	2.028.594	0,632	1	14	0
P6	532.116	0,602	5	5	1
P7	608.578	0,595	8	8	1
P8	297.837	0,598	6	3	1
P9	2.064.796	0,606	4	12	1
P10	9.456.368	0,629	2	1	1

Continua

Código Identificador	Valor do Investimento (R$)	CC	Classificação pelo Modelo Proposto	Classificação pela TIR	Variável de Decisão
P11	530.555	0,498	15	6	1
P12	12.617.854	0,559	11	15	0
P13	1.553.435	0,550	12	11	1
P14	2.012.989	0,618	3	10	1
P15	5.149.507	0,589	10	2	1
Total	**22.890.807**	**6,975**	**-**	**-**	**-**

Tabela 10 – Cálculo da carteira de investimentos pelo método da taxa interna de retorno.

É interessante perceber que caso esta última abordagem, fosse utilizada de fato, uma série de equívocos teriam sido cometidos. O projeto “P5”, por exemplo, aquele que havia apresentado o melhor desempenho anteriormente, não teria sido selecionado. Ou seja, apesar de ele não ser o mais atrativo do ponto de vista econômico, o fato de ele apresentar bom desempenho em outros critérios de análise não teria sido levado em consideração.

Por outro lado, o projeto “P15” apresentou o segundo melhor desempenho econômico, mas não foi selecionado pelo modelo multicritérios, uma vez que seu bom desempenho econômico não foi suficiente para compensar seu mau desempenho nos demais critérios de decisão.

Percebe-se também que o coeficiente de proximidade da carteira “ótima” calculada por esta abordagem é aproximadamente 7% inferior ao obtido no modelo multicritérios, enquanto que o orçamento necessário para sua execução é aproximadamente 13% superior. Portanto, esta carteira não apenas desconsidera uma série de objetivos importantes para quem toma a decisão, como também é mais dispendiosa.

A nova abordagem multicritérios proposta por esta pesquisa mostrou que uma vez que, do ponto de vista econômico, todos os projetos apresentaram indicadores

bastante atrativos, os demais critérios de avaliação, que em outra ocasião teriam sido colocados de maneira implícita e subjetiva, é que acabaram representando o fator mais decisivo na escolha final da carteira de investimentos da refinaria.

5. Considerações Finais

Desde o momento em que este projeto de pesquisa teve início, buscou-se elaborar um modelo teórico quantitativo capaz de auxiliar o processo de tomada de decisão envolvendo projetos de investimentos nas refinarias de petróleo brasileiras, um ambiente complexo por natureza e vital para a economia e para o desenvolvimento de algumas das principais políticas públicas no Brasil.

Idealmente, o modelo elaborado deveria apresentar simplicidade, de tal maneira que o usuário tivesse capacidade de compreendê-lo e aplicá-lo na prática, mas ao mesmo tempo teria que ser suficientemente robusto para que os aspectos mais complexos associados ao problema de decisão não fossem tratados de maneira superficial.

Tendo portanto como foco a busca pelo equilíbrio entre simplicidade e robustez, a opção feita por se utilizar um modelo multicritérios do tipo mensuração de valor na etapa de priorização dos projetos de investimentos pareceu adequada.

Apesar do caráter compensatório característico deste tipo de abordagem, a literatura pesquisada mostrou que estes modelos tendem a ser mais lógicos e intuitivos, evitando o chamado efeito “caixa preta”, que ocorre quando o usuário não entende o que acontece por dentro da metodologia, não se sente confortável com os resultados e as recomendações apresentados por ela e acaba por abandoná-la.

Em se tratando de modelos de mensuração de valor, a literatura acadêmica tem uma clara preferência pela utilização do AHP de Saaty. Porém, em razão da quantidade de critérios de avaliação envolvidos, da quantidade de avaliadores e do número de alternativas disponíveis no problema estudado, este projeto optou por uma abordagem baseada em TOPSIS.

Esta escolha é plenamente justificada, tomando como exemplo o caso prático apresentado neste trabalho, um problema de decisão composto por seis critérios de

avaliação, quinze alternativas e três avaliadores envolvidos. Caso este problema fosse equacionado e resolvido através de uma abordagem baseada em AHP, 630 comparações paritárias teriam que ser efetuadas por cada avaliador. Ou seja, 1.890 comparações paritárias teriam que ser executadas no total, tornando o modelo complexo demais para ser implementado na prática.

O TOPSIS, por sua vez, exige como informação de entrada apenas a avaliação numérica ou categórica de cada um dos critérios e de cada uma das alternativas sob a perspectiva de cada critério, tornando-o menos dispendioso e uma alternativa mais viável para o problema específico que foi objeto deste projeto de pesquisa.

Além disso, a incorporação da lógica fuzzy à metodologia TOPSIS foi capaz de capturar de maneira bastante adequada as avaliações muitas vezes subjetivas e imprecisas associadas a conceitos tão amplos e tão difíceis de serem colocados de maneira exata, como aqueles relacionados aos princípios do desenvolvimento sustentável.

Já na etapa de seleção, optou-se pela utilização de um algoritmo exato do tipo “branch and bound” já que, na maior parte dos casos, os problemas não são tão simples para serem resolvidos por um algoritmo do tipo “força bruta” e nem tão complexos ao ponto de haver a necessidade de se recorrer a um algoritmo aproximado que sacrificaria a qualidade da solução.

Embora o caso prático estudado na seção 4.3.3 deste trabalho, especificamente, pudesse ser resolvido por um algoritmo do tipo “força bruta”, se esta fosse a abordagem de seleção escolhida para o modelo, sua utilização traria sérias limitações. Caso o usuário quisesse simplesmente adicionar mais cinco alternativas para serem analisadas pelo modelo, o número de soluções viáveis para o problema subiria de 32.768 para 1.048.576, impedindo que o problema pudesse ser resolvido de maneira simples e impondo um limite muito baixo para o número de projetos que poderiam ser analisados em uma única rodada. O estudo conduzido por Hristakeva e Shrestha (2005) mostrou que algoritmos de força bruta não são processáveis para problemas com mais de 25 itens, enquanto que algoritmos exatos como os baseados em “branch and bound” ou em programação dinâmica, podem ser facilmente implementados para problemas com até 500 itens.

O modelo adotou também como premissa simplificadora que os projetos de investimentos não são divisíveis, ou seja, o tomador de decisão não tem a flexibilidade de selecionar nenhum projeto de forma parcial.

Embora esta premissa não seja sempre verdadeira, uma vez que na prática há a possibilidade de se realizar parte do investimento no ano corrente e parte em um momento posterior, ela se apresentou como uma boa aproximação. Os projetos de melhorias operacionais nas refinarias de petróleo brasileiras, em sua maioria, possuem prazos de implementação relativamente curtos, normalmente inferiores a um ano e se aproveitam das janelas criadas pelas paradas de manutenção das unidades de processo para serem implementados, havendo na prática poucos projetos capazes de serem implementados em mais de uma etapa.

Além disso, do ponto de vista estritamente matemático, o problema da mochila booleana é muito mais difícil de ser resolvido que o problema da mochila fracionária. Seria muito mais fácil adaptar o modelo desenvolvido neste trabalho para se resolver um problema em que os projetos são perfeitamente divisíveis do que o contrário.

Recomenda-se, portanto que pesquisas futuras no tema tenham como foco o aprimoramento do modelo de seleção, de tal forma que se possa considerar que alguns dos projetos em análise são divisíveis e outros não.

Outra limitação que poderia ser abordada por um novo projeto de pesquisa seria a incorporação de outros tipos de restrição ao modelo, além da orçamentária, como as limitações que naturalmente ocorrem no uso de recursos humanos e outros recursos materiais necessários à execução dos projetos.

Por fim, considera-se que os objetivos inicialmente propostos para este projeto de pesquisa foram atendidos de maneira satisfatória. Conseguiu-se obter um modelo suficientemente simples, ao ponto de ser facilmente implementado em uma planilha eletrônica, robusto, ao ser capaz de lidar de maneira bastante adequada com algumas das principais peculiaridades que envolvem o setor do refino de petróleo no Brasil e flexível o suficiente para que os critérios de análise e as alternativas de decisão pudessem ser facilmente adicionados, removidos ou alterados de acordo com as necessidades específicas exigidas.

6. Referências Bibliográficas

ANP. Agência Nacional do Petróleo. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo e do Gás Natural 2013.** Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Acessado em 08/09/2013.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, RJ, Elsevier Campus, 2007.

ARAÚJO, C.A.; **Bibliometria: Evolução Histórica e Questões Atuais**, Em Questão, Porto Alegre, RS, v. 12, n. 1, p. 11-32, jan/jun., 2006.

ARAÚJO, F.S.T. **PETROBRAS: Seu Papel na Política de Petróleo e o Processo de Internacionalização Econômica**, Dissertação (Mestrado) – Escola Brasileira de Administração Pública, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 1996.

AULICINO, M.C. **Organização na Produção por Processos Contínuos – Práticas, Conceitos e Métodos de Projetos para Fronteiras Interpenetrantes**, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Produção, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2008.

BARBIERI, J.C.; ÁLVARES, A.C.T.; MACHLINE, C.; **Taxa Interna de Retorno: Controvérsias e Interpretações**, GEPROS – Gestão da Produção, Operações e Sistemas, Ano 2, Vol. 5, p. 131-142, 2007.

BASTOS, L. N. V.; ALMEIDA, A. T. **Utilização do Método Promethee II na Análise das Propostas de Preços em um Processo de Licitação.** In: ENEGEP (Encontro Nacional de Engenharia de Produção), Curitiba, 2002.

BB INVESTIMENTOS. BB-Banco de Investimento S.A. **Flash de Mercado e Revisão de Preço de 29 de novembro de 2013.** Disponível em: <http://www.acionista.com.br/bb_investimentos/291113_Revisao_Preco.pdf>. Acessado em 05/01/2014.

BEHZADIAN, M.; KAZEMZADEH, R.B.; ALBADVI, A.; AGHDASI, M. **PROMETHEE: A Comprehensive Literature Review on Methodologies and Applications**, European Journal of Operational Research, 200, p. 198-215, 2010.

BELLMAN, R.E.; ZADEH, L.A. **Decision Making in a Fuzzy Environment**, Management Science, 17, p. 141-164, 1970.

BELTON, V.; STEWART, T.J. **Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach** Boston, MA, Kluwer Academic Publishers, 2002.

BERTRAND, J. W. M..; FRANSOO, J. C.; **Modelling and Simulation – Operations Management Research Methodologies Using Quantitative Modeling**, International Journal of Operations & Production Management, Vol. 22, No. 2, p. 241-264, 2002.

BOGETOFT, P.; PRUZAN, P. **Planning with Multiple Criteria: Investigation, Communication, Choice**, New York, NY, Elsevier Science Pub. Co, 1991.

BRANS, J.P.; MARESCHAL, B. In: FIGUEIRA, J., GRECO, S., EHRGOTT, M. (Eds.), **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys**. Springer Science + Business Media, Inc, p. 163-196, 2005.

BREALEY, R.A.; MYERS, S.C.; ALLEN, F. **Principles of Corporate Finance**, 9th Edition, Boston, MA, 2008

BRUNSTEIN, I. **Economia de Empresas**, São Paulo, Ed. Atlas, 2005.

BRUNSTEIN, I.; TOMIYA, E. **Modelo Econômico de Empresa Sucroalcooleira,** Gestão & Produção Vol. 2, No. 3, p. 264-280, 1995

CHEN, C.T.; **Extensions of the Fuzzy TOPSIS for Group Decision Making Under Fuzzy Environment**, Fuzzy Sets and Systems, 114, p. 1-9, 2000.

COSTA, R.P.; ABRAMCZUK, A.A.; MARTINEZ JUNIOR, L.C. **A Lógica Fuzzy e a Análise de Alternativas de Investimentos**, GEPROS – Gestão da Produção, Operações e Sistemas, Ano 2, Vol. 3 p. 73-84, 2007.

DAMODARAN, A. **Avaliação de Investimentos: Ferramentas e Técnicas para a Determinação do Valor de Qualquer Ativo**, Rio de Janeiro, RJ, Qualitymark, 2002

DIXIT, A.; PINDYCK, R.S. **Investment Under Uncertainty**, Princeton, NJ, Princeton University Press, 1994.

DONG, W.; SHAH, H.C. **Vertex Method for Computing Functions of Fuzzy Variables**, Fuzzy Sets and Systems, 24, p. 65-78, 1987.

DUBOIS, D.; PRADE, H. **Operations on Fuzzy Numbers**, Int. J. Systems Sci., Vol. 9, No. 6, p. 613-626, 1978.

EHRLICH, P.J. **Engenharia Econômica: Avaliação e Seleção de Projetos de Investimentos**, São Paulo, SP, Ed. Atlas, 1989.

FILIPPINI, R. **Operations Management Research: Some Reflections on Evolution, Models and Empirical Studies in OM**, International Journal of Operations & Productions Management, Vol. 17, No. 7, p. 655-670, 1997.

GAO, S; ZHANG, Z.; CAO, C. **Multiplication Operation on Fuzzy Numbers**, Journal of Software, Vol. 4, No. 4, p. 331-338, 2009.

GASS, S.I. **The Setting of Weights in Linear Goal-Programming Problems**, Comput. Opns Res., Vol. 14, No. 3, p. 227-229, 1987.

GONÇALVES NETO, A.C.; CALÔBA, G.M.; MOTTA, R.R. **Engenharia Econômica** In: MOTTA, R.R.; COSTA, R.P.; CALOBA, G.; GONÇALVES, A.; NEVES, C.; NAKAGAWA, M. Engenharia Econômica e Finanças, Capítulo 3, p. 101-156 Editora Campus, 2009.

GREINER, M.A.; FOWLER, J.W. **A Hybrid Approach Using the Analytic Hierarchy Process and Integer Programming to Screen Weapon Systems Projects.** IEEE Transactions on Engineering Management, v. 50, n. 2, p. 192-203, 2003.

HRISTAKEVA, M.; SHRESTHA, D. **Different Approaches to Solve the 0/1 Knapsack Problem**, Midwest Instruction and Computing Symposium, Eau Claire, WI, p. 1-14, 2005.

KASSAI, J.R **Conciliação Entre a TIR e ROI: Uma Abordagem Matemática e Contábil do Retorno do Investimento**, Revista Brasileira de Contabilidade, 103, p. 8-26, 1997.

KEENEY, R.; RAIFFA, H. **Decision with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs,** New York, NY, Wiley, 1976.

KOLESAR, P.J. **A Branch and Bound Algorithm for the Knapsack Problem**, Management Science, Vol. 13, No. 9, p. 723-735, 1967.

LØKEN, E. **Use of Multicriteria Decision Analysis Methods for Energy Planning Problems**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, p. 1584-1595, 2007.

MACIAS-CHAPULA, C.A.. **O Papel da Informetria e da Cienciometria e sua Perspectiva Nacional e Internacional**, Ci. Inf., Brasília, v. 27, n. 2. p. 134-140, mai/ago, 1998.

MARTINEZ JUNIOR, L.C. **Modelo de Análise de Investimento Baseado em Sistemas Especialistas e Lógica Fuzzy**, Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MARTINS, E. **Contabilidade de Custos**, São Paulo, Ed. Atlas, 9ª. Edição, 2003.

MENDONÇA, F.M.; INFANTE, C.E.D.; VALLE, R.A.B. **Aplicação do Método Electre III na Avaliação de Desempenho de Redes de Empresas Produtoras de Artesanato: O Caso da Região de Minas Gerais**, Revista Symposium Lavras, 16, v.8, n.2, p. 65-81, 2010.

MITROFF, I.I.; BETZ, F.; PONDY, L.R.; SAGASTI, F. **On Managing Science in the Systems Age: Two Schemas for the Study of Science as a Whole Systems Phenomenon**, Interfaces, Vol. 4, No. 3, p. 46-58, 1974.

MORABITO, R.; PUREZA, V. **Modelagem e Simulação** In: MIGUEL P.A.C. (coordenador); FLEURY, A.; MELLO, C.H.P.; NAKANO, D.N.; LIMA, E.P.; TURRIONI, J.B.; HO, L.L.; MORABITO, R.; MARTINS, R.A.; SOUSA, R.; COSTA, S.E.G.; PUREZA, V. Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações, Capítulo 8, p. 165-194, Rio de Janeiro, RJ, Elsevier Campus, 2010.

MOTTA, R.R..; CALOBA, G.; **Análise de Investimentos: Tomada de Decisão em Projetos Industriais**, São Paulo, SP, Ed. Atlas, 2002

NICHOLAS, D.; RITCHIE, M. **Literature and Bibliometrics**. London, Clive Bingley, 1978.

PSINGER, D. **Algorithms for the Knapsack Problems**, Thesis (PhD) – Dept. of Computer Science, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark, 1995.

ROCHA-LIMA JUNIOR, J.; MONETTI, E.; ALENCAR, C.T. **Real Estate: Fundamentos para Análise de Investimentos**, Rio de Janeiro, RJ, Editora Campus-Elsevier, 2011.

ROMERO, C. **Handbook of Critical Issues in Goal Programming**, Oxford, Pergamon Press, 1991.

SAATY, T. **The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority, Resource Allocation.** New York, McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T. **Fundamentals of the Analytic Network Process,** ISAHP 1999, Kobe, Japan, p. 12-14, 1999.

SAATY, T. **Theory and Applications of the Analytic Network Process**. Pittsburgh, PA, RWS Publications, 2005.

SCHEUBREIN, R.; ZIONTS, S. **A Problem Structuring Front End for a Multiple Criteria Decision Support System**, Computers and Operations Research, 33, p. 18-31, 2006.

SHIMIZU, T. **Decisão nas Organizações: Introdução aos Problemas de Decisão Encontrados nas Organizações e nos Sistemas de Apoio à Decisão**, Ed. Atlas, São Paulo, 2001.

TAGUE-SUTCLIFFE,J. **An Introduction to Informetrics. Information Processing & Management**, Oxford, v. 28, n. 1, p. 1-3, 1992.

TAMIZ, M.; MIRRAZAVI, S.K.; JONES, D. **Extensions of Pareto Efficiency Analysis to Integer Goal Programming**, Omega International Journal Management Science, 27, p. 179-188, 1999.

TORRES, O.F.F.T. **Fundamentos da Engenharia Econômica e da Análise Econômica de Projetos**, São Paulo, SP, Editora Thomson, 2006.

VINHA, V. **As Empresas e o Desenvolvimento Sustentável: A Trajetória da Construção de uma Convenção** In: MAY, P. Economia do Meio Ambiente: Teoria e Prática, Capítulo 8, p. 181-204, Ed. Campus, São Paulo, 2010.

WALLENIUS, J.; DYER, J.S.; FISHBURN, P.C.; STEUER, R.E.; ZIONTS, S.; DEB, K. **Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: Recent Accomplishments and What Lies Ahead**, Management Science, Vol. 54, No. 7, p. 1336-1349, 2008.

WONGTSCHOWSKI, P. **Indústria Química: Riscos e Oportunidades**, São Paulo, SP, Edgar Blucher, 2ª. Edição, 2002.

ZADEH, L.A. **Fuzzy Sets**, Information and Control, 8, p. 338-353, 1965.

ZIONTS, S.. **MCDM: If Not a Roman Numeral, then What?**, Interfaces, Vol. 9, No. 4, Aug., p. 94-101, 1979.

7. Apêndice A – Tabelas Complementares

Código Identificador	C1	C2	C3	C4	C5	C6
P1	(1,00; 2,33; 4,33)	(9,00; 10,00; 10,00)	(9,00; 10,00; 10,00)	(1,00; 2,33; 4,33)	(1,67; 3,67; 5,67)	(5,00; 7,00; 8,67)
P2	(6,33; 8,33; 9,67)	(5,00; 7,00; 9,00)	(9,00; 10,00; 10,00)	(5,00; 7,00; 9,00)	(6,33; 8,00; 9,00)	(2,67; 4,33; 6,33)
P3	(1,67; 3,00; 5,00)	(8,33; 9,67; 10,00)	(9,00; 10,00; 10,00)	(1,00; 2,33; 4,33)	(4,33; 6,33; 8,00)	(4,33; 6,33; 8,33)
P4	(8,33; 9,67; 10,00)	(4,33; 6,33; 8,00)	(9,00; 10,00; 10,00)	(4,33; 6,33; 8,33)	(4,33; 6,33; 8,00)	(3,00; 5,00; 7,00)
P5	(7,67; 9,33; 10,00)	(5,67; 7,67; 9,00)	(6,33; 8,33; 9,67)	(8,33; 9,67; 10,00)	(1,67; 3,67; 5,67)	(5,67; 7,67; 9,33)
P6	(1,67; 3,00; 5,00)	(7,00; 8,67; 9,67)	(9,00; 10,00; 10,00)	(9,00; 10,00; 10,00)	(7,67; 9,33; 10,00)	(3,00; 5,00; 7,00)
P7	(9,00; 10,00; 10,00)	(6,33; 8,33; 9,67)	(9,00; 10,00; 10,00)	(3,67; 5,67; 7,67)	(2,33; 4,33; 6,33)	(2,33; 4,33; 6,33)
P8	(1,33; 3,00; 5,00)	(6,33; 8,00; 9,00)	(9,00; 10,00; 10,00)	(6,33; 8,33; 9,67)	(8,33; 9,67; 10,00)	(6,33; 8,00; 9,00)
P9	(9,00; 10,00; 10,00)	(5,67; 7,67; 9,00)	(8,33; 9,67; 10,00)	(5,00; 7,00; 8,67)	(0,67; 2,33; 4,33)	(4,33; 6,33; 8,00)
P10	(2,33; 4,33; 6,33)	(9,00; 10,00; 10,00)	(9,00; 10,00; 10,00)	(7,67; 9,33; 10,00)	(2,33; 4,33; 6,33)	(6,33; 8,00; 9,33)

Continua

Código Identificador	C1	C2	C3	C4	C5	C6
P11	(1,00; 2,33; 4,33)	(9,00; 10,00; 10,00)	(8,33; 9,67; 10,00)	(1,00; 2,33; 4,33)	(1,67; 3,67; 5,67)	(5,00; 7,00; 8,67)
P12	(8,33; 9,67; 10,00)	(5,67; 7,67; 9,33)	(6,33; 8,33; 9,67)	(1,33; 3,00; 5,00)	(0,67; 2,33; 4,33)	(7,67; 9,33; 10,00)
P13	(8,33; 9,67; 10,00)	(5,00; 7,00; 9,00)	(9,00; 10,00; 10,00)	(1,33; 3,00; 5,00)	(4,33; 6,33; 8,00)	(2,33; 4,33; 6,33)
P14	(2,67; 4,33; 6,33)	(7,67; 9,33; 10,00)	(9,00; 10,00; 10,00)	(9,00; 10,00; 10,00)	(7,00; 9,00; 10,00)	(2,33; 4,33; 6,33)
P15	(6,33; 8,33; 9,67)	(9,00; 10,00; 10,00)	(9,00; 10,00; 10,00)	(1,00; 2,33; 4,33)	(1,00; 2,33; 4,33)	(7,67; 9,33; 10,00)
Peso	(0,77; 0,93; 1,00)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,83; 0,97; 1,00)	(0,17; 0,37; 0,57)	(0,50; 0,70; 0,87)

Tabela 11 - Média das avaliações de cada proposta de projeto e da importância de cada critério de análise convertidos para números fuzzy.

Código Identificador	C1	C2	C3	C4	C5	C6
P1	(0,10; 0,23; 0,43)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,10; 0,23; 0,43)	(0,17; 0,37; 0,57)	(0,50; 0,70; 0,87)
P2	(0,63; 0,83; 0,97)	(0,50; 0,70; 0,90)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,50; 0,70; 0,90)	(0,63; 0,80; 0,90)	(0,27; 0,43; 0,63)
P3	(0,17; 0,30; 0,50)	(0,83; 0,97; 1,00)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,10; 0,23; 0,43)	(0,43; 0,63; 0,80)	(0,43; 0,63; 0,83)
P4	(0,83; 0,97; 1,00)	(0,43; 0,63; 0,80)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,43; 0,63; 0,83)	(0,43; 0,63; 0,80)	(0,30; 0,50; 0,70)
P5	(0,77; 0,93; 1,00)	(0,57; 0,77; 0,90)	(0,63; 0,83; 0,97)	(0,83; 0,97; 1,00)	(0,17; 0,37; 0,57)	(0,57; 0,77; 0,93)
P6	(0,17; 0,30; 0,50)	(0,70; 0,87; 0,97)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,77; 0,93; 1,00)	(0,30; 0,50; 0,70)
P7	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,63; 0,83; 0,97)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,37; 0,57; 0,77)	(0,23; 0,43; 0,63)	(0,23; 0,43; 0,63)
P8	(0,13; 0,30; 0,50)	(0,63; 0,80; 0,90)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,63; 0,83; 0,97)	(0,83; 0,97; 1,00)	(0,63; 0,80; 0,90)
P9	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,57; 0,77; 0,90)	(0,83; 0,97; 1,00)	(0,50; 0,70; 0,87)	(0,07; 0,23; 0,43)	(0,43; 0,63; 0,80)
P10	(0,23; 0,43; 0,63)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,77; 0,93; 1,00)	(0,23; 0,43; 0,63)	(0,63; 0,80; 0,93)

Continua

Código Identificador	C1	C2	C3	C4	C5	C6
P11	(0,10; 0,23; 0,43)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,83; 0,97; 1,00)	(0,10; 0,23; 0,43)	(0,17; 0,37; 0,57)	(0,50; 0,70; 0,87)
P12	(0,83; 0,97; 1,00)	(0,57; 0,77; 0,93)	(0,63; 0,83; 0,97)	(0,13; 0,30; 0,50)	(0,07; 0,23; 0,43)	(0,77; 0,93; 1,00)
P13	(0,83; 0,97; 1,00)	(0,50; 0,70; 0,90)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,13; 0,30; 0,50)	(0,43; 0,63; 0,80)	(0,23; 0,43; 0,63)
P14	(0,27; 0,43; 0,63)	(0,77; 0,93; 1,00)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,70; 0,90; 1,00)	(0,23; 0,43; 0,63)
P15	(0,63; 0,83; 0,97)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,90; 1,00; 1,00)	(0,10; 0,23; 0,43)	(0,10; 0,23; 0,43)	(0,77; 0,93; 1,00)

Tabela 12 - Matriz de decisão fuzzy normalizada.

Código Identificador	C1	C2	C3	C4	C5	C6
P1	(0,08; 0,22; 0,43)	(0,81; 1,00; 1,00)	(0,81; 1,00; 1,00)	(0,08; 0,23; 0,43)	(0,03; 0,13; 0,32)	(0,25; 0,49; 0,75)
P2	(0,49; 0,78; 0,97)	(0,45; 0,70; 0,90)	(0,81; 1,00; 1,00)	(0,42; 0,68; 0,90)	(0,11; 0,29; 0,51)	(0,13; 0,30; 0,55)
P3	(0,13; 0,28; 0,50)	(0,75; 0,97; 1,00)	(0,81; 1,00; 1,00)	(0,08; 0,23; 0,43)	(0,07; 0,23; 0,45)	(0,22; 0,44; 0,72)
P4	(0,64; 0,90; 1,00)	(0,39; 0,63; 0,80)	(0,81; 1,00; 1,00)	(0,36; 0,61; 0,83)	(0,07; 0,23; 0,45)	(0,15; 0,35; 0,61)
P5	(0,59; 0,87; 1,00)	(0,51; 0,77; 0,90)	(0,57; 0,83; 0,97)	(0,69; 0,93; 1,00)	(0,03; 0,13; 0,32)	(0,28; 0,54; 0,81)
P6	(0,13; 0,28; 0,50)	(0,63; 0,87; 0,97)	(0,81; 1,00; 1,00)	(0,75; 0,97; 1,00)	(0,13; 0,34; 0,57)	(0,15; 0,35; 0,61)
P7	(0,69; 0,93; 1,00)	(0,57; 0,83; 0,97)	(0,81; 1,00; 1,00)	(0,31; 0,55; 0,77)	(0,04; 0,16; 0,36)	(0,12; 0,30; 0,55)
P8	(0,10; 0,28; 0,50)	(0,57; 0,80; 0,90)	(0,81; 1,00; 1,00)	(0,53; 0,81; 0,97)	(0,14; 0,35; 0,57)	(0,32; 0,56; 0,78)
P9	(0,69; 0,93; 1,00)	(0,51; 0,77; 0,90)	(0,75; 0,97; 1,00)	(0,42; 0,68; 0,87)	(0,01; 0,09; 0,25)	(0,22; 0,44; 0,69)
P10	(0,18; 0,40; 0,63)	(0,81; 1,00; 1,00)	(0,81; 1,00; 1,00)	(0,64; 0,90; 1,00)	(0,04; 0,16; 0,36)	(0,32; 0,56; 0,81)

Continua

Código Identificador	C1	C2	C3	C4	C5	C6
P11	(0,08; 0,22; 0,43)	(0,81; 1,00; 1,00)	(0,75; 0,97; 1,00)	(0,08; 0,23; 0,43)	(0,03; 0,13; 0,32)	(0,25; 0,49; 0,75)
P12	(0,64; 0,90; 1,00)	(0,51; 0,77; 0,93)	(0,57; 0,83; 0,97)	(0,11; 0,29; 0,50)	(0,01; 0,09; 0,25)	(0,38; 0,65; 0,87)
P13	(0,64; 0,9; 1)	(0,45; 0,7; 0,9)	(0,81; 1,00; 1,00)	(0,11; 0,29; 0,5)	(0,07; 0,23; 0,45)	(0,12; 0,3; 0,55)
P14	(0,2; 0,4; 0,63)	(0,69; 0,93; 1,00)	(0,81; 1,00; 1,00)	(0,75; 0,97; 1,00)	(0,12; 0,33; 0,57)	(0,12; 0,30; 0,55)
P15	(0,49; 0,78; 0,97)	(0,81; 1,00; 1,00)	(0,81; 1,00; 1,00)	(0,08; 0,23; 0,43)	(0,02; 0,09; 0,25)	(0,38; 0,65; 0,87)

Tabela 13- Matriz de decisão fuzzy normalizada e ponderada.

Código Identificador	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Total
P1	0,771	0,110	0,110	0,766	0,848	0,543	3,148
P2	0,324	0,366	0,110	0,389	0,716	0,693	2,599
P3	0,714	0,146	0,110	0,766	0,764	0,578	3,077
P4	0,216	0,427	0,110	0,442	0,764	0,658	2,616
P5	0,249	0,319	0,267	0,180	0,848	0,505	2,368
P6	0,714	0,228	0,110	0,146	0,679	0,658	2,534
P7	0,183	0,267	0,110	0,497	0,825	0,700	2,582
P8	0,724	0,280	0,110	0,295	0,670	0,486	2,565
P9	0,183	0,319	0,146	0,393	0,891	0,582	2,514
P10	0,623	0,110	0,110	0,216	0,825	0,482	2,365

Continua

Código Identificador	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Total
P11	0,771	0,110	0,146	0,766	0,848	0,543	3,184
P12	0,216	0,316	0,267	0,717	0,891	0,416	2,823
P13	0,216	0,366	0,110	0,717	0,764	0,700	2,873
P14	0,612	0,183	0,110	0,146	0,687	0,700	2,437
P15	0,324	0,110	0,110	0,766	0,889	0,416	2,615

Tabela 14 - Cálculo da distância existente entre cada alternativa de decisão e a solução positiva ideal (FPIS).

Código Identificador	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Total
P1	0,283	0,941	0,941	0,286	0,202	0,538	3,191
P2	0,769	0,708	0,941	0,693	0,345	0,370	3,826
P3	0,339	0,912	0,941	0,286	0,297	0,505	3,280
P4	0,861	0,631	0,941	0,632	0,297	0,414	3,775
P5	0,838	0,743	0,807	0,886	0,202	0,584	4,059
P6	0,339	0,833	0,941	0,912	0,389	0,414	3,828
P7	0,885	0,807	0,941	0,572	0,228	0,368	3,800
P8	0,336	0,769	0,941	0,788	0,394	0,584	3,812
P9	0,885	0,743	0,912	0,679	0,150	0,491	3,861
P10	0,446	0,941	0,941	0,861	0,228	0,597	4,013

Continua

Código Identificador	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Total
P11	0,283	0,941	0,912	0,286	0,202	0,538	3,162
P12	0,861	0,757	0,807	0,340	0,150	0,665	3,579
P13	0,861	0,708	0,941	0,340	0,297	0,368	3,514
P14	0,450	0,885	0,941	0,912	0,385	0,368	3,940
P15	0,769	0,941	0,941	0,286	0,150	0,665	3,752

Tabela 15 - Cálculo da distância existente entre cada alternativa de decisão e a solução negativa ideal (FNIS).

Código Identificador	FPIS	FNIS	CC	Classificação
P1	3,148	3,191	0,503	14
P2	2,599	3,826	0,596	7
P3	3,077	3,280	0,516	13
P4	2,616	3,775	0,591	9
P5	2,368	4,059	0,632	1
P6	2,534	3,828	0,602	5
P7	2,582	3,800	0,595	8
P8	2,565	3,812	0,598	6
P9	2,514	3,861	0,606	4
P10	2,365	4,013	0,629	2

Continua

Código Identificador	FPIS	FNIS	CC	Classificação
P11	3,184	3,162	0,498	15
P12	2,823	3,579	0,559	11
P13	2,873	3,514	0,550	12
P14	2,437	3,940	0,618	3
P15	2,615	3,752	0,589	10

Tabela 16 - Cálculo do coeficiente de proximidade (CC) e do ranking final de cada alternativa de decisão.