JOICE CAVALHEIRO RIBEIRO GIACON

SELEÇÃO DE FORNECEDORES POR ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO E OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA CONSIDERANDO ASPECTOS DE LOGÍSTICA E SUSTENTABILIDADE

São Paulo
2012

JOICE CAVALHEIRO RIBEIRO GIACON

SELEÇÃO DE FORNECEDORES POR ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO E OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA CONSIDERANDO ASPECTOS DE LOGÍSTICA E SUSTENTABILIDADE

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

São Paulo
2012

JOICE CAVALHEIRO RIBEIRO GIACON

SELEÇÃO DE FORNECEDORES POR ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO E OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA CONSIDERANDO ASPECTOS DE LOGÍSTICA E SUSTENTABILIDADE

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

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas Logísticos

Orientador:
Prof. Dr. Hugo T. Y. Yoshizaki

São Paulo
2012

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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

São Paulo, 02 de janeiro de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Giacon, Joice Cavalheiro Ribeiro
Seleção de fornecedores por análise de decisão multicritério e otimização combinatória considerando aspectos de logística e sustentabilidade / J.C.R. Giacon. -- ed.rev. -- São Paulo, 2012.
138 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. Sistemas Logísticos.

1. Análise de decisão 2. Logística 3. Otimização combinatória 4. Programação linear 5. Sustentabilidade I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

À minha mãe, Bel, que acreditou em mim em todos os momentos e me inspirou confiança e determinação para realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu marido, Luciano, pelo apoio e incentivo durante todo o mestrado, principalmente nos momentos mais difíceis, e pela compreensão em todas as longas noites e finais de semana de estudo.

Aos meus pais, Maria Isabel e Matias, pelos bons exemplos em toda minha vida e por terem despertado em mim a paixão pela leitura e pelo conhecimento, e a garra para alcançar meus objetivos.

Ao meu orientador, Professor Hugo, por ter compartilhado seu vasto conhecimento em suas orientações, e pela calma e compreensão nos momentos de dificuldade durante o desenvolvimento desta dissertação. Agradeço também pela sua disponibilidade e dedicação concedidas sempre que foi preciso.

Aos Professores Maria Lúcia e Rui, por aceitarem o convite de participação na banca de qualificação desta dissertação, dedicando seu tempo e contribuindo com observações essenciais para a melhoria deste trabalho.

Ao Professor Gilberto, pelas aulas de MCDA que ampliaram meu conhecimento e auxiliaram na concepção do tema desta dissertação, e pela contribuição técnica sobre a metodologia na condução deste trabalho.

Aos Professores Claudio Barbieri, Marco Brinati e Nicolau Gualda, por todo conhecimento adquirido em suas aulas que certamente aumentaram minha capacidade de análise crítica e me deram ferramentas para execução desta dissertação.

Aos pesquisadores do Laboratório Cislog, Celso Hino e Irineu Brito, pelas dicas e auxílio com a revisão bibliográfica e com a modelagem matemática e análises de sensibilidade para este trabalho.

Aos colegas de turma e aos colegas da sala GOL, em especial à Catalina pelo auxílio na modelagem da teoria combinatória, e ao André pelas discussões sobre análise de decisão multicritérios e pelo apoio durante o GC-Log.

À Natura, principalmente à equipe de Suprimentos, por me apoiar em todos os momentos em que precisei estar ausente do trabalho devido ao estudo, e pela inspiração para o tema desta dissertação. Em especial, ao meu diretor em 2009, Marcello Rodrigues, por me incentivar a cursar o mestrado e buscar meu aprimoramento profissional e pessoal.

Por fim, agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse possível, e me encorajaram nos últimos anos a perseguir meus objetivos.

RESUMO

A seleção de fornecedores é um problema complexo e que vem ganhando importância estratégica nas organizações, principalmente devido à inclusão de diversos atributos que podem ser especificados de acordo com as necessidades da situação, pois o fator custo não é mais o único responsável pela decisão. A relevância da sustentabilidade, em termos econômicos, ambientais e sociais, traz ao tema ainda mais atributos que devem ser mapeados como parte da decisão. Neste trabalho é proposta uma abordagem baseada em otimização combinatória (programação linear inteira) aliada à análise de valor multicriterial que estabelece prioridades e compensações entre os atributos definidos, para seleção de fornecedores de um conjunto de embalagens de cosméticos para uma nova linha de produtos. A solução encontrada é comparada aos métodos de otimização tradicionais (monocriteriais) e à otimização multicriterial sem leilão combinatório. Também são realizadas análises de sensibilidade com o modelo, permitindo que sejam feitas validações de forma a justificar a decisão.

Palavras-chave: Seleção de fornecedores. Análise multicritério. MCDA. Programação inteira. Otimização combinatória. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Supplier selection is a complex issue that has gained strategic importance in organizations, mainly due to the consideration of several criteria that can be specified according to the situation, since cost is no longer solely responsible for the decision. The sustainability relevance, in economical, environmental and social terms, brings to the theme even more criteria that should be included as part of the decision. This work proposes an approach based on combinatorial optimization (integer linear programming) combined with multi-criteria value analysis that establishes priorities and trade-offs among the defined criteria, to the supplier selection of a cosmetics packaging set for a new product line. The obtained solution is compared to traditional optimization methods (mono-criteria) and to the multi-criteria optimization without combinatorial auction. Sensitivity analyses are also performed with the model, allowing assessments to be made in order to justify the decision.

Keywords: Supplier selection. Multicriteria Analysis. MCDA. Integer Programming. Combinatorial optimization. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Impactos do desenvolvimento da complexidade nas decisões de fornecimento. 21
Figura 2 – Visão geral do VFT 31
Figura 3 – Estruturação inicial do método MCDA 32
Figura 4 – Fases de aplicação do método MCDA 33
Figura 5 – Espaço de alocações combinatórias para um leilão de 4 itens 37
Figura 6 – Aplicação do método MCDA proposto ao problema 45
Figura 7 – Evolução do método de *swing-weights* 48
Figura 8 – Exemplo de ponto de quebra de uma função não linear, para modelagem como função linear por trechos 53
Figura 9 – Evolução do faturamento (livre de impostos) da indústria cosmética brasileira nos últimos 15 anos 63
Figura 10 – Comparativo da variação do crescimento do Brasil, da indústria brasileira e da indústria cosmética brasileira, nos últimos 15 anos 63
Figura 11 – Comparativo da variação de preços no Brasil, destacando os produtos de higiene e de beleza, nos últimos 5 anos 64
Figura 12 – Exemplo de linha de produtos cosméticos (somente ilustrativo) 66
Figura 13 – Brainstorming com características desejadas para as novas embalagens 70
Figura 14 – Árvore de valores para o problema proposto 70
Figura 15 – Atribuição de pesos para priorização dos atributos 80
Figura 16 – Construção da função de valor para o atributo Custo 81
Figura 17 – Função de valor para o atributo Custo Total 82
Figura 18 – Função de valor para o atributo Emissões de GEE 83
Figura 19 – Função de valor para o atributo Prazo de Desenvolvimento 83
Figura 20 – Função de valor para o atributo Prazo de Entrega (*lead time*) 84
Figura 21 – Alocação de itens por fornecedor na otimização monocritério por Custo Total 95
Figura 22 – Alocação de itens por fornecedor na otimização monocritério por Emissões de GEE 95

Figura 23 – Alocação de itens por fornecedor na otimização monocritério por Prazo de Desenvolvimento 96
Figura 24 – Alocação de itens por fornecedor na otimização monocritério por Prazo de Entrega 96
Figura 25 – Resultado otimizado da designação de fornecedores aos itens, na otimização multicriterial 97
Figura 26 – Gráfico do valor da decisão para cada modelo analisado, sob a luz de cada um dos atributos e na abordagem multicritério 98
Figura 27 – Resultado otimizado da designação de fornecedores aos itens, na otimização multicriterial combinatória 99
Figura 28 – Gráfico do valor da decisão para cada modelo analisado, sob a luz de cada um dos atributos e em ambas abordagens multicritério 100
Figura 29 – Designação de itens por proposta na solução multicritério combinatória 101
Figura 30 – Otimização monocriterial do Custo Total por número de fornecedores 102
Figura 31 – Otimização monocriterial das Emissões de GEE por número de fornecedores 103
Figura 32 – Otimização monocriterial do Prazo de Desenvolvimento por número de fornecedores 103
Figura 33 – Otimização monocriterial do Prazo de Entrega por número de fornecedores 104
Figura 34 – Comparativo das soluções multicritério variando-se o número de fornecedores 104
Figura 35 – Comportamento da solução multicritério com foco em determinado atributo, por número de fornecedores 106
Figura 36 – Nova priorização de constantes de escala para análise de sensibilidade 107
Figura 37 – Resultado otimizado da designação de fornecedores aos itens, com a nova ponderação das constantes de escala, no caso multicritério 108

Figura 38 – Resultado otimizado da designação de fornecedores aos itens, com a nova ponderação das constantes de escala, no caso multicritério combinatório 109
Figura 39 – Comparativo das soluções multicritério variando-se o número de fornecedores, com a nova ponderação das constantes de escala 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos principais para performance ambiental dos fornecedores 26
Tabela 2 – Classificação dos métodos de tomada de decisão em problemas de seleção de fornecedores 27
Tabela 3 – Comparativo das abordagens encontradas na literatura para solução do problema de seleção de fornecedores vs a solução proposta neste trabalho 43
Tabela 4 – Descrição dos índices utilizados no modelo monocriterial 50
Tabela 5 – Descrição das variáveis de decisão utilizadas no modelo monocriterial 51
Tabela 6 – Descrição dos parâmetros e constantes utilizados no modelo monocriterial 51
Tabela 7 – Descrição dos índices utilizados no modelo muticritério 53
Tabela 8 – Descrição das variáveis de decisão utilizadas no modelo multicritério 54
Tabela 9 – Descrição dos parâmetros e constantes utilizados no modelo multicritério 54
Tabela 10 – Descrição dos índices utilizados no modelo muticritério combinatório 58
Tabela 11 – Descrição das variáveis de decisão utilizadas no modelo multicritério combinatório 58
Tabela 12 – Descrição dos parâmetros e constantes utilizados no modelo multicritério combinatório 59
Tabela 13 – Características das abordagens especialista e por facilitador 68
Tabela 14 – Classificação dos atributos escolhidos 73
Tabela 15 – Volume anual estimado para cada item 74
Tabela 16 – Alocação de itens por proposta do fornecedor 1 (j=1) 74
Tabela 17 – Alocação de itens por proposta do fornecedor 2 (j=2) 75
Tabela 18 – Alocação de itens por proposta do fornecedor 3 (j=3) 75
Tabela 19 – Alocação de itens por proposta do fornecedor 4 (j=4) 75
Tabela 20 – Alocação de itens por proposta do fornecedor 5 (j=5) 75

Tabela 21 – Custo por milheiro e custo total anual para propostas do fornecedor 1 (*j*=1) 76
Tabela 22 – Custo por milheiro e custo total anual para propostas do fornecedor 2 (*j*=2) 76
Tabela 23 – Custo por milheiro e custo total anual para propostas do fornecedor 3 (*j*=3) 76
Tabela 24 – Custo por milheiro e custo total anual para propostas do fornecedor 4 (*j*=4) 76
Tabela 25 – Custo por milheiro e custo total anual para propostas do fornecedor 5 (*j*=5) 77
Tabela 26 – Emissões de GEE por milheiro e anuais para propostas do fornecedor 1 (*j*=1) 77
Tabela 27 – Emissões de GEE por milheiro e anuais para propostas do fornecedor 2 (*j*=2) 77
Tabela 28 – Emissões de GEE por milheiro e anuais para propostas do fornecedor 3 (*j*=3) 78
Tabela 29 – Emissões de GEE por milheiro e anuais para propostas do fornecedor 4 (*j*=4) 78
Tabela 30 – Emissões de GEE por milheiro e anuais para propostas do fornecedor 5 (*j*=5) 78
Tabela 31 – Prazo de Desenvolvimento para cada proposta de cada fornecedor 79
Tabela 32 – Prazo de Entrega (*lead time*) para cada proposta de cada fornecedor 79
Tabela 33 – Comparativo de resultados monocritério vs. multicritério, sem combinatório 97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIHPEC – Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos

AFT – *Alternative Focused Thinking* (Pensamento Baseado em Alternativas)

AHP – *Analytical Hierarchy Process* (Método de Análise Hierárquica)

CBR – *Case-Based Reasoning* (Raciocínio Baseado em Casos)

CIF – *Cost, Insurance and Freight* (Custo, Seguro e Frete)

DEA – *Data Envelopment Analysis* (Análise Envoltória de Dados)

GEE – Gases do Efeito Estufa

GP – *Goal Programming* (Programação Multiobjetiva)

GSCM – *Green Supply Chain Management* (Gestão da Cadeia de Abastecimento Verde)

MAUT – *Multi-Attribute Utility Theory* (Teoria de Utilidade Multi-atributo)

MAVT – *Multi-Attribute Value Theory* (Teoria de Valor Multi-atributo)

MCDA – *Multi-Criteria Decision Analysis* (Análise de Decisão Multicritério)

MCDM – *Multi-Criteria Decision Making* (Tomada de Decisão Multicritério)

MOCO – *Multiobjective Combinatorial Optimization* (Otimização Combinatória Multiobjetivo)

SSCM – *Sustainable Supply Chain Management* (Gestão da Cadeia de Abastecimento Sustentável)

TCO – *Total Cost of Ownership* (Custo Total de Propriedade)

VCG – (Leilão de) Vickrey-Clarke-Groves

VFT – *Value Focused Thinking* (Pensamento Baseado em Valores)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16

1.1 Objetivo 17

1.2 Organização do trabalho 18

2 REVISÃO DA LITERATURA 19

2.1 Histórico 19

2.2 Características do problema de seleção de fornecedores 22

2.3 A tratativa da sustentabilidade em Compras 23

2.4 Métodos para análise e solução 26

2.4.1 Metodologia MCDA na seleção de fornecedores 29

2.4.2 Leilões combinatórios 34

2.4.3 Aplicação de MCDA com otimização combinatória em leilões 39

2.5 Conclusões 41

3 PROPOSTA DE ABORDAGEM 44

3.1 Metodologia MCDA 44

3.1.1 Definição da árvore de valores e dos atributos 46

3.1.2 Definição das alternativas 47

3.1.3 Definição das constantes de escala 47

3.1.4 Definição das funções de valor 49

3.2 Modelagem matemática 50

3.2.1 Otimização monocriterial 50

3.2.2 Otimização multicriterial 52

3.2.3 Otimização multicriterial combinatória 58

4 APLICAÇÃO À INDÚSTRIA COSMÉTICA 62

4.1 Particularidades da indústria cosmética 62

4.2 Caso escolhido para estudo 66

4.3 Aplicação da metodologia MCDA ao caso 69
4.3.1 Definição da árvore de valores e dos atributos 69
4.3.2 Impactos das alternativas 73
4.3.3 Definição das constantes de escala 79
4.3.4 Definição das funções de valor 80
4.4 Aplicação da modelagem matemática ao caso 85
4.4.1 Otimização monocriterial 85
4.4.2 Otimização multicriterial 87
4.4.3 Otimização multicriterial combinatória 90

5 RESULTADOS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE 94
5.1 Resultados 94
5.1.1 Otimização monocriterial 95
5.1.2 Otimização multicriterial 96
5.1.3 Otimização multicriterial combinatória 99
5.2 Análise de sensibilidade 102
5.2.1 Por número de fornecedores 102
5.2.2 Por ponderação das constantes de escala 105
5.3 Impacto das análises na tomada de decisão 110

6 CONCLUSÕES 111

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 114

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS COMPLEMENTARES 120

APÊNDICE A – Modelagem Solver 123

1 INTRODUÇÃO

Na gestão moderna da cadeia de suprimentos, o processo de seleção de fornecedores é considerado uma atividade estratégica, que exige uma avaliação abrangente de diversos critérios, não sendo dependente apenas do custo mas também de outros benefícios importantes identificados pela empresa para a decisão. As relações entre cliente e fornecedor baseadas apenas em preço não são mais aceitas para materiais críticos e pelas organizações que introduziram inovações na gestão de sua cadeia de abastecimento, incluindo também as preocupações socioambientais. A junção entre fatores sustentáveis e estratégicos para o negócio forma um papel vital para a resiliência de longo prazo da cadeia (BAI; SARKIS, 2010), no entanto relacioná-los em um método de seleção e avaliação de fornecedores é uma tarefa complexa e muitas vezes polêmica devido à natureza contraditória de diversos fatores que devem ser considerados.

Existe uma demanda crescente por processos de seleção de fornecedores que consideram diversos atributos tanto quantitativos quanto qualitativos, e mais esforços devem ser orientados para combinar estes fatores de forma racional e sistemática (SONMEZ, 2006). Além dos atributos tradicionais que focam em custo, qualidade e nível de serviço, um requerimento adicional vem ganhando destaque nos últimos anos, que é a incorporação de atributos sustentáveis no processo de seleção de fornecedores, motivado pela maior consciência do consumidor sobre o meio-ambiente e por regulamentações socioambientais estipuladas para empresas (SONMEZ, 2006; HANDFIELD et al., 2002).

A economia e a sociedade dependem dos recursos naturais, pois todos os produtos e serviços que chegam ao homem são originados da natureza. A estratégia de negócios moderna deve ser sustentável, não pelo marketing da marca, mas sim porque é a única maneira de se planejar um horizonte de longo prazo. Hoje empresas que compartilham deste ideal ganham vantagem competitiva ao praticarem uma gestão estratégica dos desafios ambientais, reduzindo os riscos e incrementando valor aos negócios (ESTY; WINSTON, 2006).

Como a sustentabilidade é interdependente, a responsabilidade se estende por todos os elos da cadeia, nos termos econômicos, sociais e ambientais, conhecido

como *triple bottom line*. Faz parte de uma decisão de fornecimento assertiva a avaliação de aspectos sustentáveis dos fornecedores, e a escolha por aqueles que são propagadores dos mesmos valores do cliente e que contribuem para a preservação dos recursos naturais e para desenvolvimento da sociedade. Com a inclusão destes parâmetros, o preço pago pode ser diferente do menor preço de venda do mercado, porém será um custo de aquisição eficiente para o futuro.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é propor uma abordagem para o problema de seleção de fornecedores de materiais produtivos de uma empresa brasileira de cosméticos, utilizando análise de decisão multicritério conjuntamente com programação linear combinatória. O modelo permite selecionar fornecedores para um grupo de produtos considerando aspectos individuais de desempenho de cada atributo escolhido, que são customizados de acordo com as preferências do cliente, e também ganhos resultantes de combinações entre os itens, oferecidos pelos próprios fornecedores.
O resolução através da otimização multicriterial combinatória permite a atribuição de pesos a cada atributo de acordo com funções de valor desenhadas para cada benefício, especificamente pelo próprio decisor, o que torna o modelo apto para aplicação em outros problemas de seleção em diversos tipos de negócio, desde que os parâmetros de cada escolha (atributos, prioridades e comportamentos das funções de valor) sejam definidos especialmente para cada caso. Por exemplo, o modelo pode ser customizado e utilizado tanto para a seleção de um insumo para fabricação de determinado produto, quanto para um serviço, como a escolha de uma ou mais transportadoras dado um conjunto de rotas em concorrência para entregas em uma determinada região.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho é segmentado da seguinte maneira, em capítulos:

- Capítulo 2: Apresentação da revisão da literatura sobre o problema de seleção de fornecedores, com as abordagens mais usuais do tema e um aprofundamento teórico sobre os métodos e tratativas escolhidos para resolução neste trabalho, que consistem na teoria multicritério, na otimização combinatória e na aplicação de sustentabilidade na área de compras.
- Capítulo 3: Descrição da metodologia proposta para abordar o problema, de forma teórica, com as principais considerações e toda formulação matemática sugerida.
- Capítulo 4: Aplicação prática da metodologia proposta à indústria cosmética, escolhida para o estudo, com a definição dos parâmetros importantes para decisão, seguimento passo-a-passo dos métodos planejados e customização da modelagem matemática para o caso.
- Capítulo 5: Apresentação dos resultados obtidos para todos os modelos implementados, comparando-os entre si; e discussão a partir das análises de sensibilidade conduzidas.
- Capítulo 6: Conclusão da pesquisa desenvolvida, ressaltando os principais aspectos inferidos, resultados obtidos, dificuldades na condução do trabalho e sugestões para prosseguimento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O processo de seleção de fornecedores para prover determinados produtos ou serviços está presente em todas as organizações, englobando desde a definição do problema, que caracteriza a necessidade de um fornecedor específico e os atributos que serão utilizados para análise, como os fornecedores serão qualificados com base nestes atributos e por fim a escolha propriamente dita (DE BOER; LABRO; MORLACCHI, 2001).

É usual que exista uma grande quantidade de informações e áreas interessadas na decisão, o que justifica a utilização de métodos multicriteriais para auxiliar a análise do problema. No entanto, existem diversas maneiras de selecionar fornecedores, algumas delas citadas neste capítulo, com foco nos modelos de otimização por programação linear inteira, otimização combinatória e análise multicritério que são objetos deste estudo.

No entanto, a literatura sobre seleção de fornecedores tradicional não foca em fatores sociais ou ambientais, mesmo que um movimento para a consideração destes esteja emergindo e hoje já existam referências neste campo (BAI; SARKIS, 2010), que são mostradas na seção 2.3, comprovando sua importância na tratativa dos problemas de seleção de fornecedores de forma integral.

2.1 Histórico

A área de compras surgiu nas organizações apenas com o papel de adquirir os insumos necessários pelo menor preço de aquisição possível, e era vista como executora de tarefas burocráticas e sem participação estratégica nos objetivos da empresa. Com o tempo, a atividade de compras ganhou força e importância devido ao grande impacto financeiro que possui, ao aumento das terceirizações e também à ênfase nos relacionamentos de longo prazo entre fornecedores e compradores (BOWERSOX; CLOSS; COOPER, 2006).

Hoje é de conhecimento intrínseco que a função de compras faz parte da gestão do negócio de uma organização, e que sem um sistema de seleção de fornecedores eficiente, que tenha capacidade de avaliar se os diferenciais exigidos pela empresa estão presentes no produto ou serviço em questão, é impossível garantir qualidade e custos competitivos, tornando a decisão de fornecimento de extrema importância no meio corporativo. Também é reconhecido que os problemas de seleção de fornecedores são complexos devido à grande quantidade de atributos que podem ser considerados na decisão, sabe-se que desde 1960 diversos autores na comunidade acadêmica e na indústria buscam formas de relacioná-los, sendo que naquela época já era possível listar mais de 50 fatores importantes para decisão de fornecimento, destacando-se como mais utilizados: custo, qualidade do produto, performance de entrega e capacidade de fornecimento (WEBER; CURRENT; BENTON, 1991).

Devido à esta multiplicidade, a estratégia contemporânea de compras analisa o custo total de propriedade (TCO – *Total Cost of Ownership*), e não só o preço de compra do insumo, já que este é apenas uma parte da equação. O TCO envolve também os custos indiretos de qualidade, capacidade logística, manutenção, entre outros que afetam o ciclo de vida do produto, quantificando todos os custos presentes na cadeia de valor da empresa devido àquela aquisição (BOWERSOX; CLOSS; COOPER, 2006; DEGRAEVE; LABRO; ROODHOOFT, 2000).

A complexidade da atividade de compras é crescente com o passar do tempo, enfatizada por diversos fatores como a globalização, que aumenta a rede de escolhas possíveis para o fornecimento, e a variedade de atributos que se tornam importantes para a tomada da decisão, conforme pode ser visto na Figura 1 (DE BOER; LABRO; MORLACCHI, 2001). A consequência deste fato é que as decisões de fornecimento se tornam mais estratégicas e os fornecedores passam a construir um relacionamento com o cliente, que tende a possuir uma quantidade menor de fornecedores, com os quais estabelece um vínculo de confiança (DE BOER; LABRO; MORLACCHI, 2001; HO; XU; DEY, 2010).

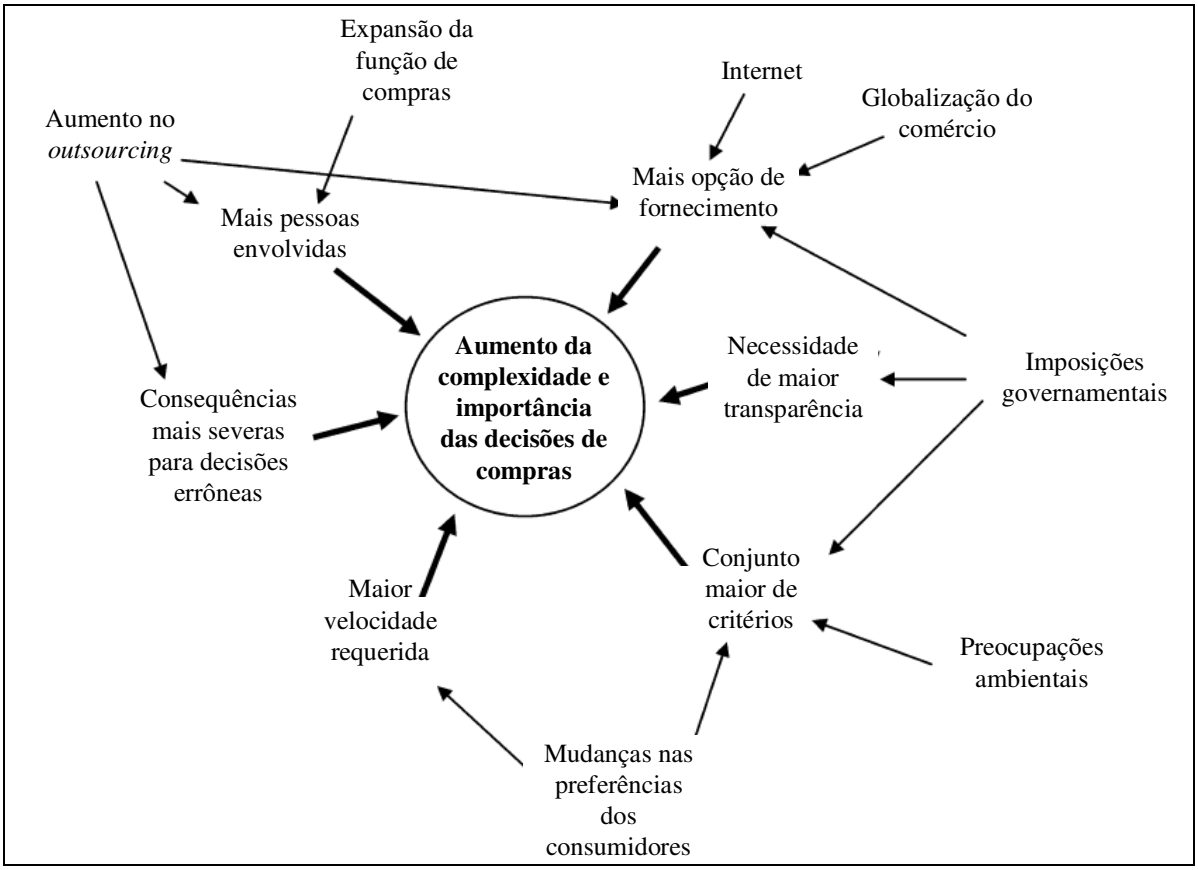


Figura 1 – Impactos do desenvolvimento da complexidade nas decisões de fornecimento.
Fonte: traduzido de De Boer, Labro e Morlacchi (2001).

Também é consenso entre trabalhos relevantes na área, desde 1980, a importância da avaliação dos fornecedores no momento da decisão e a relatividade das compensações entre os atributos (TALLURI; NARASIMHAN, 2004). Estes dois fatores irão corroborar a decisão de fornecimento e prevenir que a escolha errada seja feita, por meio da certificação de que os valores desejados estão sendo atendidos.

Sonmez (2006), em sua revisão da literatura sobre seleção de fornecedores, pesquisou 147 artigos publicados entre 1985 e 2005, e constatou que existem duas ênfases principais: nos atributos de decisão e constantes de escala associadas para seleção, e nos métodos e ferramentas de tomada de decisão propostos para abordagem do problema. Ambas serão abordadas no desenvolvimento desta dissertação, de uma forma inovadora em relação ao já publicado até o momento.

2.2 Características do problema de seleção de fornecedores

A seleção de fornecedores é considerada pela maioria dos autores um processo de cinco fases: a identificação da necessidade de um novo fornecedor, a determinação do atributo de decisão a ser utilizado, a pré-qualificação dos fornecedores aptos a participar do processo, a seleção final dos fornecedores e por fim o monitoramento e avaliação contínua dos fornecedores escolhidos (SONMEZ, 2006). Neste trabalho, será dado foco nas fases de determinação do atributo de decisão (e metodologia de abordagem do problema) e também na seleção final dos fornecedores; as demais fases do problema não serão aprofundadas neste momento.

Apesar do problema de seleção de fornecedores ter natureza multicriterial, porque se deseja diversos atributos de um fornecedor, é comum sua resolução por métodos de objetivo único. Um atributo prioritário é otimizado e todos os demais são considerados restrições do modelo e têm o mesmo peso na decisão, o que dificilmente ocorre na realidade. Outra dificuldade encontrada com este formato é a quantificação dos atributos qualitativos (WADHWA; RAVINDRAN, 2007).

No entanto, a utilização de métodos de tomada de decisão multicritério vem se ampliando nos últimos anos, e sua importância como ferramenta para seleção de fornecedores é reconhecida na comunidade acadêmica (WALLENIUS et al., 2008; HO; XU; DEY, 2010). Sua característica de adaptação a diferentes necessidades é essencial para atendimento da dinâmica de mercado atual. No entanto, a decisão pelo melhor fornecedor muitas vezes possui atributos conflitivos (como minimizar o custo e maximizar a qualidade), e um fornecedor em potencial que possua níveis de desempenho ruins em alguns atributos (em comparação a outros fornecedores) pode ser penalizado. Esta dificuldade encontrada nos cenários reais é sanada por meio de compensações de valor entre os atributos (MONTIBELLER; FRANCO, 2007; LUO et al., 2009), que explicita as preferências do cliente e prioriza o que é realmente importante para a decisão.

A atribuição de pesos consistentes aos diversos atributos que são importantes para a decisão é uma atividade de grande dificuldade, e em geral feita de maneira arbitrária ou subjetiva (TALLURI; NARASIMHAN, 2004). A metodologia desenvolvida por Keeney (1996) sobre Pensamento Baseado em Valores (VFT – *Value Focused Thinking*), utilizada na Análise de Decisão Multicritérios (MCDA – *Multi-Criteria*

Decision Analysis), que será vista em detalhe na seção 2.4.1 deste texto, trata a mensuração dos atributos analisando os valores intrínsecos à decisão ao invés de focar nas alternativas como usual, que é uma análise reativa. Com foco nos valores, é possível enxergar as oportunidades da decisão, criar alternativas que atendam ao objetivo do problema e, mais importante, que estejam alinhadas com os objetivos fundamentais da empresa. Deste modo, além de estabelecer os parâmetros de valor de cada atributo, a atribuição dos pesos é realizada de modo coerente com a prioridade que cada atributo tem para a organização.

Outra característica importante do problema de seleção de fornecedores é se há ou não interação entre os itens do conjunto proposto, ou seja, se pode ser feito um leilão combinatório no qual a aquisição de dois ou mais itens de um mesmo fornecedor é mais vantajosa que a compra individual, ou se a compra dos itens é independente. A economia de escopo existe quando o custo de um determinado produto ou serviço é dependente não apenas do volume deste (economia de escala), mas também da existência de outro produto ou serviço, que faz com que todo conjunto seja mais vantajoso (CAPLICE; SHEFFI, 2003). Geralmente os leilões combinatórios são apresentados na forma de descontos financeiros por pacotes de fornecimento, que podem ser sugeridos tanto pelo comprador tanto pelo fornecedor. Este modelo é visto em detalhe na seção 2.4.2.

2.3 A tratativa da sustentabilidade em Compras

As práticas de Compras nas organizações evoluíram significativamente nos últimos 20 anos, passando de uma função tática e sem visibilidade, visando apenas o menor custo, para ser determinante na competitividade da empresa, sendo capaz de oferecer produtos melhores, de forma mais rápida, com o menor custo e a maior flexibilidade (HANDFIELD et al., 2002). Contudo, somente benefícios logísticos (nível de serviço) e econômicos (custo) não são mais suficientes para a completa gestão da cadeia de suprimentos, com a complexidade existente nos dias de hoje.

Os insumos adquiridos por uma organização podem afetar o nível de resíduos e poluição gerada, através de impactos diretos ou indiretos, e a percepção da existência desta dimensão ambiental aumentou muito a complexidade do processo

de compras (HANDFIELD et al., 2002), criando o conceito de “Gestão da Cadeia de Abastecimento Verde” (GSCM – *Green Supply Chain Management*), definido por Bowen et al. (2001) como “os planos e atividades de uma organização compradora que integrem aspectos ambientais na Gestão da Cadeia de Abastecimento de forma a melhorar o desempenho ambiental de fornecedores e clientes”.

Todavia, a sustentabilidade está embasada no *triple bottom line*, o tripé que balanceia os aspectos econômicos, ambientais e sociais, e este último ainda necessita ser incorporado aos modelos de seleção de fornecedores encontrados na literatura, como constataram Bai e Sarkis (2010), devido à escassez de trabalhos com a tratativa de fatores como equidade social e saúde dos colaboradores da empresa frente aos encontrados considerando aspectos ambientais, mais avançados nas empresas.

É necessário então ampliar o conceito de GSCM para a chamada “Gestão da Cadeia de Abastecimento Sustentável” (SSCM – *Sustainable Supply Chain Management*), conforme definido por Carter e Rogers (2008):

> SSCM é a integração e alcance estratégicos e transparentes das metas sociais, ambientais e econômicas de uma organização, dentro da coordenação sistêmica dos processos-chave internos do negócio para melhorar o desempenho econômico de longo prazo do indivíduo e sua cadeia de abastecimento.

Isso significa que a sustentabilidade global de uma empresa só pode ser atingida incorporando-se as práticas de SSCM, pois os benefícios sociais, ambientais e econômicos serão reduzidos caso clientes e fornecedores não estejam alinhados e integrados com as práticas sustentáveis da organização. Ajudar os fornecedores a reconhecerem a importância dos aspectos ambientais e sociais e suportá-los na busca de iniciativas que vão de encontro a este ideal é uma das maiores questões que as empresas enfrentam hoje (AGERON; GUNASEKARAN; SPALANZANI, 2011).

Um ponto importante destacado por diversos autores (Zhu e Sarkis, 2004; Rao e Holt, 2005; Koplin, Seuring e Mesterharm, 2007; Large e Thomsen, 2011; Yen e Yen, 2011) é que organizações que adotam práticas e políticas sustentáveis tem vantagem competitiva sobre aquelas que se baseiam apenas em fatores econômicos, e este fato se comprova quando as metas da empresa estão integradas e alinhadas à estratégia de Compras. Também é mencionado que o comprometimento da alta gestão é crucial para o sucesso das atividades de gestão

da cadeia de suprimentos sustentável (YEN; YEN, 2011).

Neste contexto, Suprimentos tem um papel estratégico para influenciar e guiar os comportamentos sustentáveis dos fornecedores, criando uma coordenação vertical na cadeia que traz impactos positivos diretos para o negócio, pois uma empresa só poderá alcançar suas metas socioambientais se tiver fornecedores aptos tecnicamente que a suportem (LARGE; THOMSEN, 2011; YEN; YEN, 2011). No entanto, incorporar considerações socioambientais no processo de seleção de fornecedores altera significativamente o processo de compras, e até o momento não há consenso na literatura de qual é a melhor forma de consideração e medição destes atributos, muitas vezes subjetivos, por mais que diversas empresas já estejam integrando estes conceitos em seu processo decisório (HANDFIELD et al., 2002). Ageron, Gunasekaran e Spalanzani (2011) completam mencionando que é necessária a execução de mais pesquisas na área de SSCM, principalmente nos temas de educação dos fornecedores nas práticas sustentáveis, integração dos atributos sustentáveis na seleção de fornecedores e na avaliação da inovação trazida pelos fornecedores aos mercados sustentáveis.

Handfield et al. (2002) conduziram um estudo de caso com o *Grupo Delphi* (indústria automotiva) e exemplificaram a complexidade da integração de atributos ambientais para avaliação de fornecedores. A Tabela 1 mostra os 10 atributos mais importantes e os 10 atributos de medição mais fácil, sob o ponto de vista dos gerentes de logística desta organização. Todos os atributos foram classificados como relevantes pelo grupo.

Tabela 1 – Atributos principais para performance ambiental dos fornecedores, para o *Grupo Delphi*. Fonte: traduzido de Handfield et al., 2002

Critérios mais importantes	Critérios mais facilmente medidos
1. Divulgação pública dos registros ambientais	1. Certificação ISO 14000
2. Avaliação ambiental dos fornecedores do 2º elo da cadeia	2. Uso de substâncias agravantes para a camada de Ozônio
3. Gestão dos resíduos perigosos	3. Uso de materiais reciclados
4. Gestão dos resíduos e poluentes tóxicos	4. Uso de compostos orgânicos voláteis
5. Uso de materiais perigosos	5. Uso de materiais perigosos
6. Certificação ISO 14000	6. Retrabalhos
7. Logística reversa	7. Uso de embalagens recicladas ou minimizadas
8. Uso de embalagens ambientalmente corretas	8. Logística reversa
9. Uso de substâncias agravantes para a camada de Ozônio	9. Participação em programas ambientais
10. Gestão da emissão de gases perigosos	10. Divulgação pública dos registros ambientais

Deve-se ressaltar que os atributos mostrados na Tabela 1 foram eleitos por um grupo específico, apenas com o intuito de exemplificar a complexidade para sua consideração em um modelo de seleção de fornecedores, porém em uma situação real os atributos escolhidos devem refletir a importância relativa da estratégia da empresa, e o método deve ser capaz de considerar e ponderar diversos atributos simultaneamente, através de um sistema de medição coerente.

2.4 Métodos para análise e solução

A avaliação de fornecedores é uma das áreas mais pesquisadas na área de compras, com abordagens que variam desde métodos conceituais até os de modelagem e empíricos (TALLURI; NARASIMHAN, 2004). Os principais métodos de tomada de decisão aplicados foram classificados por Sonmez (2006) em 5 grandes

categorias, mostradas na Tabela 2 com os principais métodos utilizados em cada uma e sua representatividade perante o total de artigos estudados (91 que reportaram métodos de solução).

Tabela 2 – Classificação dos métodos de tomada de decisão em problemas de seleção de fornecedores. Fonte: adaptado e traduzido de Sonmez (2006).

Categoria	Método	Representatividade na literatura
Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas	Redes neurais	2,2%
	Raciocínio baseado em casos (CBR - Case-Based Reasoning)	8,8%
	Redes Bayesianas	1,1%
Programação Matemática	Abordagens de custo total	17,6%
	Programação não-linear	1,1%
	Programação inteira mista	3,3%
	Programação linear	3,3%
	Programação inteira	2,2%
	Heurísticas	4,4%
	Programação multiobjetiva (GP - Goal Programming)	4,4%
	Análise envoltória de dados (DEA - Data Envelopment Analysis)	5,5%
Tomada de Decisão Multicritério	Método de análise hierárquica (AHP - Analytic Hierarchy Process)	11,0%
	Outranking	2,2%
	Teoria de utilidade multi-atributo (MAUT - Multi-Attribute Utility Theory)	2,2%
	Ponto linear ponderado	1,1%
	Modelagem por julgamento	2,2%
	Modelagem interpretativa estrutural	1,1%
	Categórico	1,1%
	Lógica Fuzzy	1,1%
Análise Estatística Multivariada	Modelagem de equações estruturais	2,2%
	Análise do componente principal	1,1%
	Análise de fatores	2,2%
	Abordagem do intervalo de confiança	1,1%
Outros métodos	Tomada de decisão em grupo	8,8%
	Métodos multiplos	8,8%

O estudo realizado por Ho, Xu e Dey (2010) confirma que as principais abordagens individuais para tratamento do problema, na última década, sempre com atributos multicriteriais, são a aplicação de Análise Envoltória de Dados (DEA – *Data*

Envelopment Analysis), Programação Matemática (linear inteira, mista e não-linear), Método de Análise Hierárquica (AHP – *Analytical Hierarchy Process*) e Raciocínio Baseado em Casos (CBR – *Case-Based Reasoning*). Quando analisadas as abordagens integradas em conjunto, as mais frequentes são as integrações com AHP, em 18% dos casos, sendo a combinação mais utilizada a de AHP com Programação Multiobjetiva (GP – *Goal Programming*). A interação de uma ferramenta objetiva com uma multicritérios traz benefícios pois esta consegue comparar as importâncias relativas dos pesos entre os atributos, enquanto aquela considera as limitações dos recursos e do sistema, resultando em uma solução efetiva para problemas discretos de seleção de fornecedores.

Xia e Wu (2007) propõem uma resolução para o problema com estrutura semelhante ao realizado neste trabalho, porém com a utilização do AHP como ferramenta multicritérios, de forma que as opções de fornecimento são tratadas como alternativas e não funções de valor. Porém, os autores fazem uma modificação no AHP para melhorar a consistência dos julgamentos, para que o mesmo se torne mais objetivo, e limitam as razões de comparação entre os pares de alternativas.

Talluri (2002) criou um “jogo” inovador para seleção de fornecedores utilizando programação inteira que escolhe os fornecedores que mais estão de acordo com os parâmetros colocados como ideais pelo cliente, o que vai de encontro ao objetivo da função de valor. Os resultados possíveis para cada atributo são: 1, se o fornecedor se adequa, ou zero, caso contrário, e o fornecedor escolhido é aquele que obtém a maior pontuação e portanto, satisfaz a maioria das requisições colocadas pelo comprador. No entanto, não há priorização entre os atributos, e um fornecedor que atende um maior número de atributos menos relevantes pode levar vantagem sobre um que atende um menor número, porém com maior relevância.

A aplicação da metodologia MCDA conjuntamente com otimização por programação linear inteira não é citada em nenhuma das referências pesquisadas por Ho, Xu e Dey (2010), Sonmez (2006) e também previamente por De Boer, Labro e Morlacchi (2001) e Degraeve, Labro e Roodhooft (2000), existindo portanto a oportunidade de efetuar um trabalho inovador com esta abordagem para a seleção de fornecedores.

2.4.1 Metodologia MCDA na seleção de fornecedores

A sigla MCDA é interpretada atualmente de duas maneiras: *Multi-Criteria Decision Analysis*, que significa Análise de Decisão Multicritério, ou *Multi-Criteria Decision Aiding*, que pode ser traduzido como Apoio à Decisão Multicritério. Mesmo existindo uma diferença semântica entre "análise" e "apoio", ambas as formas estão corretas e são largamente utilizadas como sinônimos na literatura, não sendo encontrada nenhuma publicação que destacasse alguma divergência entre elas. É também usual encontrar a sigla MCDM (*Multi-Criteria Decision Making*), que significa Tomada de Decisão Multicritério, remetendo ao mesmo significado de MCDA.

Belton e Stewart (2002) classificam um problema multicritério como uma consideração de diferentes escolhas ou opções conflitantes, sendo que uma opção pode ser julgada como mais atraente que outra de acordo com as referências e pressupostos utilizados. O objetivo da metodologia MCDA, como ferramenta de auxílio a decisões complexas, é explicitar e mensurar a subjetividade do problema e integrar os objetivos desejados com julgamentos de valor, e desta forma promover o entendimento do problema e suas soluções para guiar a decisão do cliente. O MCDA não é uma metodologia para tomar a decisão, e sim para auxiliar para que a melhor decisão seja tomada (KEENEY; RAIFFA, 1976).

Pode-se classificar a metodologia MCDA em três tipos de aplicação, ou grupos de teorias desenvolvidas para tratativa dos problemas multicritério (BELTON; STEWART, 2002):

- *Modelos de mensuração de valor*: cria um sistema de pontuação para representar o grau de preferência de cada alternativa, pontuando cada atributo e posteriormente agregando a pontuação para cada alternativa em uma soma ponderada pelos pesos de cada atributo. As abordagens deste modelo mais utilizadas são a teoria de valor multi-atributo (MAVT – *Multi-Attribute Value Theory*), e também sua extensão teoria de utilidade multi-atributo (MAUT – *Multi-Attribute Utility Theory*), proposta por Keeney e Raiffa (1976), que incorpora incertezas e preferências aos riscos ao método, através de funções de utilidade. A diferença entre MAUT e MAVT é que as funções de valor não incluem as preferências em relação ao risco do decisor, que são contabilizadas na função de

utilidade. Uma das metodologias multicritério mais utilizadas em problemas de seleção de fornecedores é o AHP, proposta por Thomas Saaty em 1980.

- *Modelos de nível de referência (ou meta)*: estabelece níveis máximos a serem alcançados para cada atributo, para então procurar opções que permitem o atingimento ou que cheguem o mais próximo possível destas metas impostas. O modelo mais conhecido desta categoria é o GP, que frequentemente é utilizado na primeira fase de um problema multicritério para eliminar as alternativas menos viáveis de forma eficiente (LOKEN, 2007).
- *Modelos de outranking (sobreclassificação)*: compara as alternativas par-a-par, para cada atributo, avaliando as preferências sobre cada alternativa, para que a soma das preferências resulte na alternativa mais indicada para decisão. Dois métodos conhecidos de aplicação de *outranking* são o *Promethee* e o *Electre*.

O foco deste trabalho é para os modelos de mensuração de valor, com abordagem MAVT, de acordo com a metodologia proposta por Keeney (1992) de VFT, conforme esquematizado pela Figura 2. O VFT, em oposição ao Pensamento Baseado em Alternativas (AFT – *Alternative Focused Thinking*), direciona a metodologia de tomada de decisão para os objetivos e interesses da organização, para então traçar as alternativas que se encaixam no cumprimento destes objetivos. Já o AFT identifica primeiramente as alternativas disponíveis para então eleger aquela que mais atende ao problema, sendo uma abordagem mais pragmática porém menos criativa, e com maior risco de não solucionar de forma completa o problema.

Figura 2 – Visão geral do VFT. Traduzido de Keeney (1992)

Prado (2011), em sua dissertação de mestrado sobre seleção de fornecedores utilizando MCDA, fez uma revisão completa da literatura sobre o tema e identificou que os métodos de estruturação de problemas multicritério não são triviais, devido à complexidade intrínseca dos mesmos; no entanto seu desenho é uma atividade de extrema importância para organização da tomada de decisão. Keeney (1982) foi um dos primeiros autores a formalmente criar um método para aplicação do MCDA, baseado em 4 etapas conforme apresentado na Figura 3.

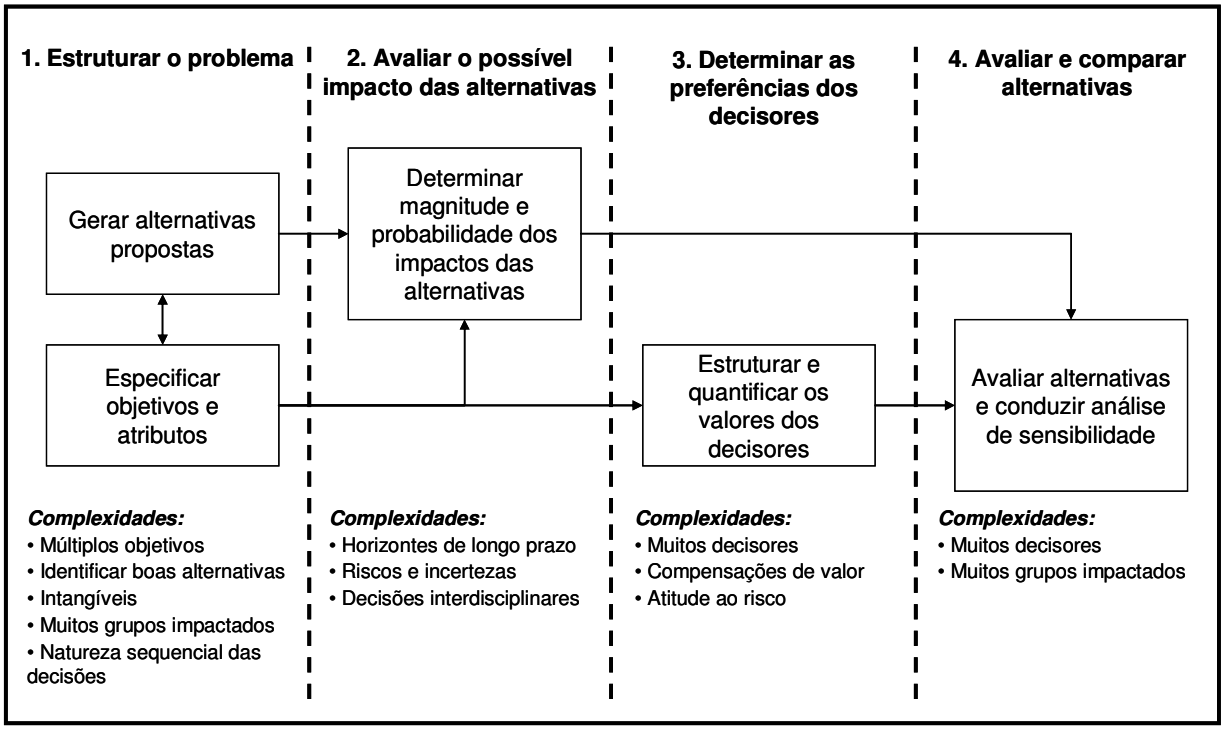


Figura 3 – Estruturação inicial do método MCDA. Fonte: adaptado e traduzido de Keeney (1982)

O método de Keeney (1982) propõe primeiramente a estruturação do problema, quais são seus objetivos, limites, características e atributos. A partir deste foco, geram-se alternativas propostas para solucionar o problema. O segundo passo é avaliar o impacto de cada alternativa, que deve estar relacionado ao objetivo inicial. Esta etapa traz em geral muitas incertezas em relação às consequências, e é usual a utilização de ferramentas matemáticas para auxílio à decisão. A terceira etapa da metodologia irá determinar as preferências, ou seja, estabelecer os atributos e constantes de escala que irão quantificar a decisão. Nesta fase são criadas as funções de valor, que mostram o perfil dos decisores perante o risco de cada alternativa e determinam quais são as compensações dentro das faixas de medição de cada atributo. No último passo, as alternativas são avaliadas, e também podem ser conduzidas análises de sensibilidade para justificar a decisão, revendo parâmetros do problema.

Desde o desenho do método MCDA feito por Keeney em 1982, diversos autores sugeriram atualizações no mesmo, de acordo com o aprofundamento das pesquisas sobre o tema que ocorreram ao longo dos anos. O fluxo do processo de análise de decisão do MCDA sugerido para direcionamento deste trabalho é apresentado na Figura 4, e foi proposto por Franco e Montibeller (2009). Foi escolhido por apresentar

de forma clara, objetiva e simples os passos do método, ser atual e por estar de acordo com a abordagem de VFT na concepção das alternativas de decisão.

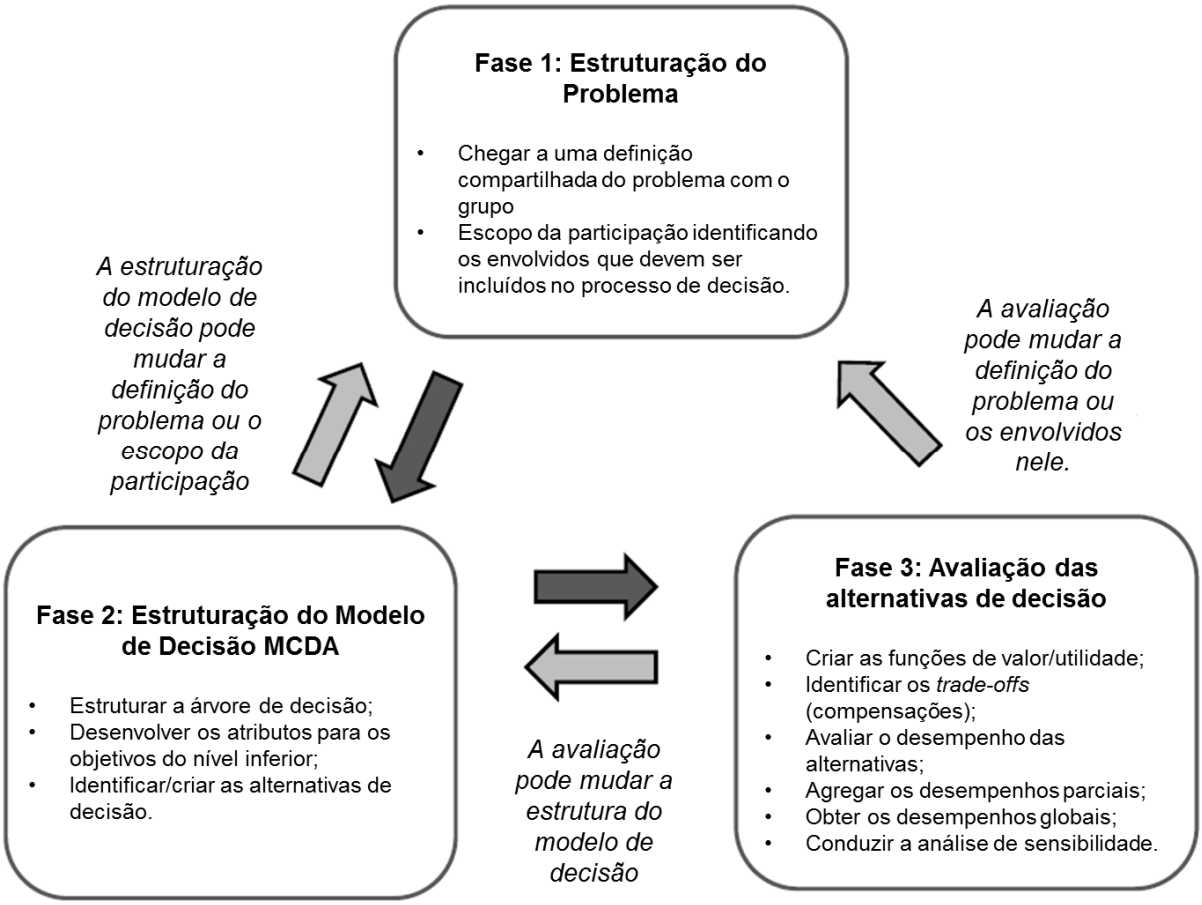


Figura 4 – Fases de aplicação do método MCDA. Traduzido de Franco e Montibeller (2009)

O método sugere 3 fases principais para condução do problema. Primeiramente, este é estruturado de forma clara e consensada com o grupo de interesse. O segundo passo é o da criação do modelo de solução propriamente dito, com identificação de todos os parâmetros importantes para decisão e das alternativas que serão avaliadas pelo modelo e de que forma. A terceira fase avalia os resultados para discussão da melhor alternativa para solução do problema, através das funções de valor e preferências, e execução de análises de sensibilidade.

2.4.2 Leilões combinatórios

A teoria de leilões está entre os tópicos mais influentes e estudados na economia nos últimos 40 anos, por responder uma das questões mais fundamentais: quem deve adquirir o que, e a que preço. Existem diversos tipos de leilões, combinatórios ou não, caracterizados pelas suas regras e pelo ambiente no qual se insere. Um leilão combinatório é caracterizado pela realização de uma oferta para uma combinação de itens, conhecida como "pacote", ao invés de um item individual, e seu estudo engloba conceitos de economia, pesquisa operacional e ciência da computação. É um problema comumente resolvido com técnicas de programação matemática aliada à otimização combinatória (CRAMTON; SHOHAM; STEINBERG, 2006).

Os leilões podem ocorrer da forma tradicional, onde o vendedor oferta um produto e os compradores fazem lances para adquiri-lo, ou da forma reversa, onde o comprador conduz o leilão para determinado item ou serviço e os vendedores fazem propostas para fornecê-lo. O ambiente de um leilão é determinado pelo número de compradores e vendedores, pelo número de itens comercializados, pela preferência dos envolvidos e pela forma em que a informação é transmitida. Em relação à informação, os leilões podem ser classificados em três tipos: valor privado (*Private Value*), no qual o participante só conhece o valor do item para ele mesmo, e a perspectiva dos outros participantes não altera este valor; valor interdependente (*Interdependent Value*), no qual o valor do item não é conhecido pelos participantes, que possuem apenas uma estimativa sobre este valor – que pode mudar caso um participante conheça as estimativas dos demais; e valor comum (*Common Value*), que é um caso de valor interdependente no qual o valor do item é o mesmo para todos os participantes do leilão.

Os leilões também são classificados pelo seu formato, há dois tipos de leilão aberto (onde as propostas são expostas ao conhecimento de todos) e dois tipos de leilão selado ou fechado (onde as propostas são confidenciais), apresentados a seguir:

- <u>Leilão ascendente ou leilão inglês</u>: o preço sobe sucessivamente até que apenas um participante permaneça, e este ganha o leilão pagando o preço final.

- Leilão descendente ou leilão holandês: o preço inicia elevado e desce sucessivamente até o primeiro participante aceitar o preço atual. É chamado de leilão holandês por ser tradicionalmente utilizado nos leilões de flores na Holanda.
- Leilão selado de primeiro preço: cada participante submete sua proposta, de forma independente, e o item é vendido pelo maior preço entre as propostas recebidas. É a forma mais comum aplicada para leilões reversos, pela sua simplicidade e rapidez.
- Leilão selado de segundo preço ou leilão de Vickrey[1]: tem a mesma dinâmica do leilão selado de primeiro preço, porém o vencedor irá pagar o preço da segunda maior proposta, e não da sua própria. Este tipo de leilão foi sugerido por William Vickrey em 1961, que posteriormente ganhou um Prêmio Nobel pela descoberta.

É importante perceber que submeter a proposta vencedora em um leilão selado de primeiro preço é equivalente a adquirir o item no mesmo valor em um leilão holandês (desde que o mesmo ainda esteja disponível); enquanto o leilão inglês é equivalente ao leilão de Vickrey, já que o lance vencedor no leilão inglês irá permanecer no jogo até o momento em que o penúltimo participante sair, sendo que o vencedor pagaria o preço que não seria pago por aquele, o segundo maior lance[2].

Os leilões combinatórios são aqueles nos quais os participantes podem propor lances com combinações entre os itens, quando existe complementariedade (o valor de um conjunto de itens é maior do que a soma individual dos mesmos) ou substituibilidade (o valor de um conjunto de itens é menor do que a soma individual dos mesmos) entre eles (AVENALI, 2009). A execução de um leilão combinatório se mostra vantajosa quando existem complementariedades entre os itens, que podem diferir de acordo com o fornecedor, como no clássico exemplo de transportes: o custo de uma determinada rota para um transportador depende do fluxo nas demais rotas, o que torna interessante a formação de um pacote de rotas mais econômico que apenas uma rota individual (CRAMTON; SHOHAM; STEINBERG, 2006).

Permitir que os participantes do leilão expressem suas preferências através dos pacotes geralmente traz uma eficiência econômica, e consequentemente maior lucro

[1] Também conhecido como leilão de Vickrey-Clarke-Groves (VCG), em sua forma combinatória.
[2] A teoria sobre leilões apresentada teve como referência as notas de aula do Professor Yossi Sheffi, obtidas durante o curso *Graduate Certificate in Global Logistics & Supply Chain Management* (*Massachusetts Institute of Technology*), realizado em Bogotá (Colômbia), em julho de 2011.

sobre o leilão. Isso ocorre devido a economias de escala e escopo presentes nas combinações dos itens complementares. A economia de escala pode alavancar produtividade a itens que passam por uma mesma fase do processo produtivo, por exemplo, enquanto a economia de escopo pode ocorrer quando há um rateio de um custo fixo, como o compartilhamento do transporte utilizado para as entregas.

Os leilões combinatórios reversos conduzidos por suprimentos em empresas possuem algumas especificidades, como as decorrentes do relacionamento de longo prazo existente entre compradores e fornecedores. Primeiramente, ambos possuem conhecimento sobre a contraparte, e os fornecedores são familiarizados com seus concorrentes pois em geral os leilões ocorrem de forma sistemática a cada um ou dois anos. Os fornecedores incumbentes também são grandes conhecedores do processo e da operação de seu cliente, tendo conhecimento de informações que podem não estar mencionadas no edital do comprador. Outro fator considerável neste caso é a reputação da empresa compradora, que pode influenciar as propostas dos fornecedores tanto de forma positiva quanto negativa (por exemplo, uma empresa que não faz os pagamentos na data combinada irá receber propostas com valores maiores dos fornecedores que tem esta informação). Uma grande vantagem do leilão combinatório reverso com relacionamento de longo prazo é que a prática de conluio não é usual, o que pode ser atribuído à familiaridade existente entre os compradores e fornecedores, ao conhecimento dos leiloeiros que já sabem o que esperar como resultado dos leilões, e ao fato de que os leilões geralmente são aplicados quando o número de fornecedores e itens é grande e há menos oportunidades para conspirações (quando há poucos fornecedores e itens usualmente se faz uma negociação direta e não um leilão).

A presença de descontos por volume faz com que a decisão de compra não seja mais baseada somente em um único item, que pode ser comprado de um ou mais fornecedores, mas em um conjunto de itens que pode ser comprado de um único fornecedor (DAHEL, 2003). Narasimhan, Talluri e Mahapatra (2008) aumentaram a complexidade deste problema ao incorporar múltiplos critérios na requisição de cotação pela qual os fornecedores são avaliados, como entregas, qualidade, capacidade de fornecimento e performance de redução de custos. Para uma proposta ter sucesso em um ambiente multidimensional, é imprescindível que o fornecedor tenha conhecimento da estrutura de preferências do comprador, que pode ser disponibilizada no leilão ou inferida através das informações disponíveis.

A alocação de fornecedores resultante de um leilão combinatório tende a ser mais eficiente do que o leilão tradicional com diversos itens, porém determinar os vencedores de forma ótima é um problema NP-completo (problema de tempo polinomial não determinístico completo), conhecido como *winner determination problem* (problema da designação dos vencedores). A Figura 5 mostra as combinações possíveis entre quatro itens de um leilão combinatório; pode-se inferir que o número de alocações cresce rapidamente com o número de itens do leilão, e só é possível de ser enumerado de forma exaustiva quando o número de itens é muito pequeno (SANDHOLM, 2000).

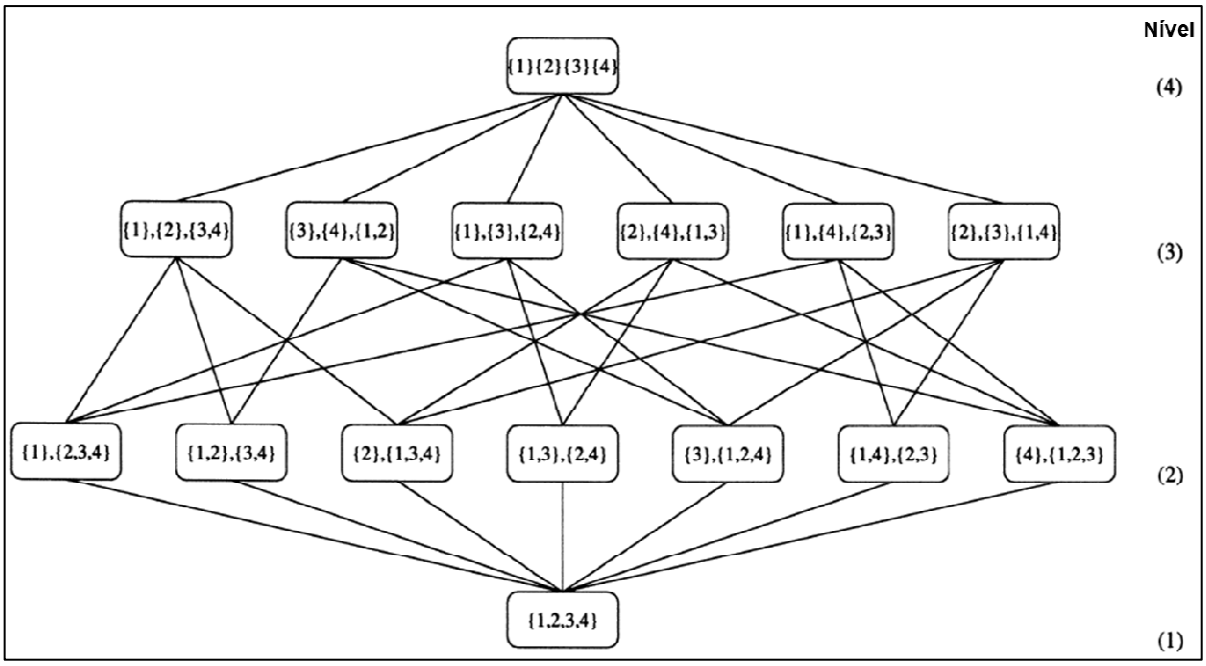


Figura 5 – Espaço de alocações combinatórias para um leilão de quatro itens.
Traduzido de Sandholm (2000)

Ainda assim, devido aos ganhos (principalmente econômicos) obtidos com a sinergia entre os itens, muitas empresas têm utilizado leilões combinatórios nos mais variados campos de atuação, como em transportes, alocação de aeronaves para chegadas e partidas em aeroportos e compras industriais, que é potencialmente um dos maiores domínios para sua aplicação (CRAMTON; SHOHAM; STEINBERG, 2006), justificando sua utilização no caso proposto.

Hohner et al. (2003) mostram a aplicação de leilões combinatórios em uma indústria alimentícia de grande porte, a norte-americana *Mars, Inc.*, para compras estratégicas. Eles exemplificam como esta abordagem é ideal para situações onde

existe sinergia entre conjuntos de fornecimento, e também são muito úteis quando a empresa precisa comprar volumes reduzidos de materiais similares, que sozinhos não trazem economias de escala. Os leilões podem ser sobrepostos, e o fornecedor pode oferecer pacotes para somente um item, dois ou todos do conjunto, o que faz com que cada fornecedor escolha os itens de acordo com o que mais o interesse.

O modelo utilizado pela *Mars, Inc.* utiliza programação linear inteira, e as regras de negócio da empresa são colocadas como restrições do modelo, como o número mínimo e máximo de fornecedores, respeito às capacidades dos mesmos etc. As principais vantagens da implantação foram o ganho de tempo dos compradores, a transparência no processo e a maior satisfação dos fornecedores, além dos ganhos financeiros substanciais atingidos em um curto prazo.

Outro exemplo de um modelo aplicado no mercado é o apresentado por Sandholm et al. (2006) para a empresa *Procter & Gamble*, uma das maiores representantes do mundo no segmento de bens de consumo. O desafio deste caso foi considerar todas as complexidades de compras existentes, alavancando volumes enquanto mantinha o bom relacionamento com os fornecedores. O resultado foi a criação de uma ferramenta que permite que o fornecedor expresse propostas criativas formando os próprios conjuntos, propondo volumes condicionais e até sugerindo inovações às propostas iniciais solicitadas pelo cliente. O modelo também capta as restrições colocadas pelo comprador, como suas preferências, cuidados na consideração de novos fornecedores e limites de fornecedores por região.

Por tratar de problemas de seleção de fornecedores em larga escala, acima de 500 itens e 5.000 ofertas, e também pela complexidade das restrições, o modelo aplicado na *Procter & Gamble* não pôde ser resolvido com otimização por programação inteira. Foram utilizadas técnicas de programação inteira mista e heurísticas, entretanto as vantagens obtidas foram similares: maior aproveitamento de cada fornecedor e consequente maior satisfação dos mesmos, ganho de tempo nas negociações e um ganho financeiro total de quase 10% até 2005.

2.4.3 Aplicação de MCDA com otimização combinatória em leilões

A utilização conjunta de multicritérios com otimização combinatória é encontrada na literatura em problemas discretos de otimização combinatória mutiobjetiva (MOCO – *Multiobjective Combinatorial Optimization*), que são reconhecidos por possuírem uma série específica de restrições que dão estrutura ao problema. Alguns exemplos comuns de sua aplicação são problemas de cobertura (*set covering*), caminho mínimo, alocação e o "caixeiro viajante" (EHRGOTT; GANDIBLEUX, 2000).

Os problemas MOCO são NP-completos, complexos para resolução, que pode ser feita através de métodos exatos e aproximados. Os métodos exatos em geral combinam os múltiplos objetivos em um objetivo único, como uma soma ponderada, ou utilizam GP para solução, minimizando os desvios para cada um dos objetivos colocados. Os métodos de aproximação utilizam heurísticas e metaheurísticas para encontrar a solução que mais se aproxima do ótimo para o problema, já que garantir o ponto ótimo não é computacionalmente ou economicamente viável em diversos casos (EHRGOTT; GANDIBLEUX, 2000). Devido ao grande número de variáveis característicos desta classe de problemas, muitas vezes a abordagem por métodos de resolução exatos não é possível, sendo que as heurísticas usadas em métodos de objetivo único, como Busca Tabu e *Simulated Annealing*, proporcionam boa aplicação na adaptação a múltiplos objetivos (ULUNGU et al., 1999).

Desta forma, para o caso tratado nesta dissertação buscou-se na literatura uma aplicação de multicritérios combinatório mais específica ao caso de compras e que pudesse ser solucionada através de métodos exatos, para melhor adequação ao ambiente dinâmico de tomada de decisão empresarial, motivador deste trabalho. Foi então encontrado um ramo de pesquisa recente que se adapta melhor ao objetivo proposto, combinando a utilização de MCDA com leilões combinatórios.

Enquanto os leilões combinatórios convencionais normalmente focam somente em custo, tem sido crescente a demanda por mecanismos capazes de considerar diversos atributos na decisão (BICHLER, 2000), o que é coerente visto que a complexidade das decisões aumentou com o decorrer dos anos. Quando isso ocorre, restringir a execução de um processo de seleção de fornecedores a uma concorrência de preços pode ter um resultado prejudicial, pois os outros atributos variantes do processo estão ocultos na tomada de decisão. No entanto, os leilões

multicritérios são mais dificeis de se analisar analiticamente do que os leilões convencionais, devido aos diversos atributos e ajustes dos parâmetros necessários para que seja construído um modelo abrangente (BICHLER, 2000; DE SMET, 2007).

O processo de seleção de fornecedores tem um cenário de grande complexidade quando são considerados leilões combinatórios multicriteriais, já que não é óbvio para o comprador qual é a combinação de atributos que será mais apropriada para a decisão. Neste contexto, as metodologias de suporte à decisão são cruciais para resolução do problema, principalmente quando há três atributos ou mais envolvidos na decisão (BICHLER, 2000; TEICH et al., 2004).

Bichler e Kalagnanam (2005) constataram que as técnicas MAUT e AHP de análise de decisão multicritérios são comumente utilizadas para suporte à decisão nesta classe de problemas, para eleger as preferências do comprador e estruturar o modelo de priorização dos atributos. De maneira geral, os modelos utilizam uma função de valor linear, ponderada através das constantes de escala determinadas para os atributos que são todos preferencialmente independentes. Alguns fornecedores de software como a *Clarus*, *IBM/Digital Union*, *Moai*, *Menerva* e *Perfect* utilizam este tipo de abordagem. Teich et al. (2004) completam dizendo que as preferências do decisor são de grande importância neste tipo de problema, e são geralmente representadas por uma função de valor multiatributo, como mostram Keeney e Raiffa (1976), já citados neste capítulo.

Em comparação aos leilões combinatórios com somente um critério, os resultados de um leilão combinatório multicritérios são muito mais sensíveis às características pessoais do grupo decisor e ao ambiente (BICHLER, 2000), já que as prioridades para decisão estabelecidas pela metodologia MCDA são desenvolvidas de acordo com cada caso. O processo combinatório multicritérios também concede ao fornecedor mais liberdade na formulação das propostas, incentivando a competitividade entre os fornecedores pelos seus pontos fortes e permitindo uma eficiência focada nos diferenciais decisivos (BICHLER; KALAGNANAM, 2005).

Apesar de essencial para suporte a decisões de fornecimento, a literatura acadêmica existente sobre leilões combinatórios multicritérios ainda é escassa (BICHLER et al., 2011), e foca em modelos teóricos e em aplicações de softwares, principalmente de e-commerce. O problema combinatório envolvendo diversos itens, diversos fornecedores e diversos atributos para decisão ainda não foi amplamente abordado na literatura, sendo conhecido como problema *puzzle* (quebra-cabeça) (KÖKSALAN

et al., 2009). De Smet (2007) e Bichler e Kalagnanam (2005) apresentam modelos teóricos multicritérios, não nomeando os atributos, e sem detalhamento da construção do modelo de auxílio à decisão e de como as decisões em relação às preferências foram tomadas. Algumas pesquisas focam na melhor combinação de fornecimento para um item comprado de mais de um fornecedor, ou seja, qual é a quantidade ideal que cada fornecedor deve prover do mesmo insumo, como nos trabalhos de Bichler et al. (2011) e Köksalan et al. (2009), que consideram também restrições de capacidade dos fornecedores, ambos de forma teórica.

Catalán et al. (2009) mostra uma aplicação prática, na qual desenvolveu um modelo combinatório de programação linear inteira para a escolha de fornecedores das refeições servidas nas escolas públicas do Chile. O modelo considera atributos como a localização geográfica dos fornecedores e o tamanho das escolas (em função do número de alunos), e em 2006 trouxe um benefício econômico de 20% ao Governo Chileno após considerar 180 cenários distintos de fornecimento. Assim como no artigo de Catalán et al. (2009), os exemplos da literatura que aplicam MCDA juntamente com leilões combinatórios focam explicitamente em benefícios de custo, não sendo encontrados materiais que utilizassem atributos sócio-ambientais como um dos fatores a serem considerados na metodologia multicritério, uma das propostas desta dissertação.

2.5 Conclusões

A literatura descrita neste capítulo ressalta a relevância do problema apresentado para solução neste trabalho, presente nas organizações de forma estratégica e com cada vez mais destaque. É reconhecido que a área de Compras pode ser o agente de mudanças mais poderoso que qualquer outra função corporativa, já que seu alcance se estende por todos os elos anteriores da cadeia (PREUSS, 2001).

Foram apresentadas diversas abordagens possíveis para solucionar o problema, encontradas na literatura. A Tabela 3 mostra um resumo dos principais artigos considerados nesta revisão, indicando quais foram as tratativas utilizadas em cada um deles. Os artigos listados foram escolhidos por terem aplicações dos principais métodos, modelos matemáticos e condições de aplicação utilizados para solucionar

problemas de seleção de fornecedores, com similaridades ao caso proposto neste trabalho em ao menos um dos aspectos, sendo que todos são referências recentes, dos últimos 10 anos.

Na última coluna estão as abordagens propostas em conjunto nesta dissertação (leilão combinatório com MCDA e considerando aspectos de sustentabilidade, aplicado à indústria cosmética), e pode-se observar que nenhum dos trabalhos pesquisados abordou a utilização desta solução integrada, o que indica que a proposta é inovadora.

Abordagens para solução do problema de seleção de fornecedores		Handfield et al. (2002)	Talluri e Narasimhan (2004)	Caplice e Sheffi (2003)	Humphreys et al. (2003)	Hohner et al. (2003)	Sandholm et al. (2006)	Wadhwa e Ravindran (2007)	Xia e Wu (2007)	De Smet (2007)	**SOLUÇÃO PROPOSTA**
Número de critérios	Monocritério			Custo		Custo	Custo				
	Multicritério	6 critérios	Qualidade, Custo, Entrega e Performance de redução de custos		30 critérios			Custo, Entrega e Refugos	Custo, Qualidade e Nível de serviço	não especificado (modelo teórico)	**Custo, Emissões de GEE, Prazo de Desenvol-vimento e Entrega**
Método/Modelo matemático	Análise de Decisão Multicritério (MCDA)									MAUT (não detalhada)	**MAVT**
	Método de Análise Hierárquica (AHP)	X							X		
	Heurísticas						X				
	Análise Envoltória de Dados (DEA)		X								
	Programação Multiobjetiva (GP)							X			
	Programação Inteira Mista								X		
	Ponderação dos objetivos (*Weighted Objective*)				X			X			
	Leilão combinatório (Programação Inteira)			X		X				X	**X**
Condições de aplicação	Tratativa da Sustentabilidade	X			X						**X**
	Tipo de Indústria	Automotiva	Telecomu-nicações	Transportes		Alimentícia	Bens de consumo				**Cosmética**

Tabela 3 – Comparativo das abordagens encontradas na literatura para solução do problema de seleção de fornecedores

3 PROPOSTA DE ABORDAGEM

A metodologia utilizada para resolução do problema proposto é uma otimização combinatória, feita através de programação linear inteira, aliada à análise de valor multicritérios. A função objetivo faz uma ponderação das propostas de cada fornecedor sob a luz de todos os atributos especificados para o caso e deve ser maximizada para buscar o melhor resultado global para o problema, aquele que atende mais adequadamente às prioridades colocadas pelo cliente. Cada atributo possui uma atribuição de peso, que indica sua relevância para a decisão, e uma função de valor que mostra a transformação da unidade original do atributo para uma base comum, tornando-o factível para comparação com os demais atributos.

Esta proposta busca eliminar as limitações encontradas em alguns dos modelos pesquisados na literatura, como a dificuldade de implantação do modelo em um ambiente empresarial, ou a mensuração subjetiva dos atributos, e ainda o tempo demandado para a decisão. Também é desejado que todas as premissas e características do problema sejam consideradas para resolução, em um método prático e efetivo.

3.1 Metodologia MCDA

Para escolha do método para aplicação no problema proposto neste trabalho, dentre os existentes na metodologia MDCA, buscou-se um de fácil utilização, com interface clara e objetiva (pois deve ser compreendido e utilizado por um grupo de pessoas responsável pela decisão), compatível com a quantidade de informações do problema e que fornecesse resultados capazes de auxiliar e embasar, de fato, a tomada de decisão.

A abordagem utilizada é MAVT, baseada no VFT, por ser uma ferramenta efetiva e transparente, feita para auxiliar os decisores em decisões difíceis e complexas, cujo objetivo é consolidar as múltiplas dimensões dos benefícios desejados na decisão em um único parâmetro ajustado pelas preferências de valor (PHILLIPS; BANA E

COSTA; 2007). O método seguido para aplicação no problema é o indicado na Figura 4 (capítulo 2). Das três fases propostas no esquema, a ênfase deste trabalho está nas fases 2 e 3, pois o problema já está estruturado na organização, onde ocorre de forma recorrente, o que será melhor explicado no próximo capítulo. As fases propostas no método de Franco e Montibeller (2009) são novamente mostradas na Figura 6, adaptadas à forma em que foram seguidas neste trabalho para melhor identificação do leitor. Entre parênteses no início de cada tópico mencionado nas fases da figura estão os números das seções do texto em que o tema foi abordado.

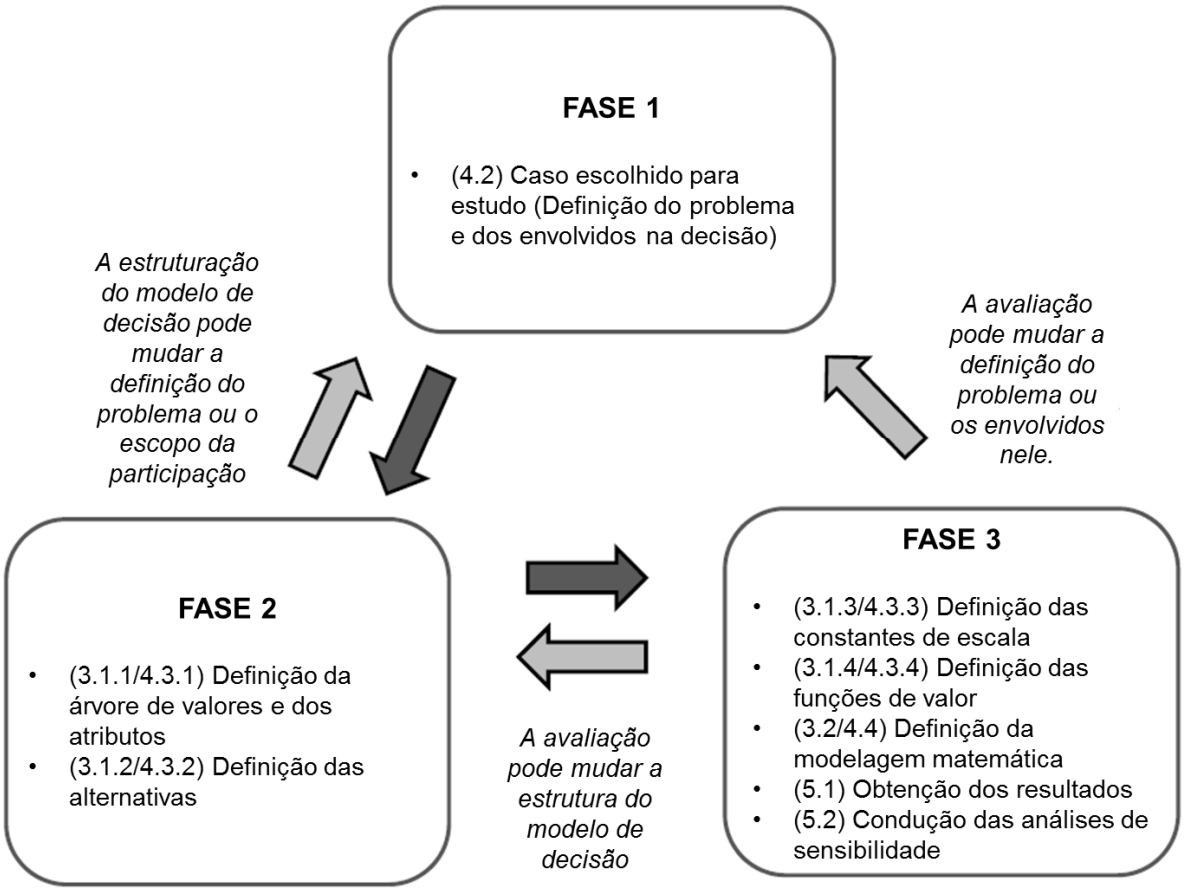


Figura 6 – Aplicação do método MCDA proposto ao problema.
(Adaptado de Franco e Montibeller (2009), Figura 4)

3.1.1 Definição da árvore de valores e dos atributos

Os termos “critério” e “atributo” comumente são utilizados como sinônimos na literatura, e nesta dissertação também não serão diferenciados. Elegeu-se o uso do termo “atributo” por ser o mais utilizado na literatura sobre o tema no Brasil.

Os atributos devem ser estabelecidos de acordo com o direcionamento dos objetivos fundamentais da empresa, especificados para a decisão em questão. São obtidos através de consenso em um grupo interdisciplinar da organização, dado o interesse de diversas áreas na decisão; é importante que as pessoas participantes tenham conhecimento do processo que representam e desenvolvam no grupo a visão global do negócio para eleger os atributos realmente efetivos para a decisão em questão. Um facilitador é utilizado na maioria dos casos para intermediar a discussão de forma construtiva, e também para restringir o número de atributos para que o modelo seja factível para análise e não perca o foco nos objetivos essenciais.

Desta maneira, para que a determinação dos atributos seja assertiva, é necessário ter em mente de forma clara quais são os objetivos buscados na decisão, e a árvore de valores é uma ferramenta efetiva para guiar a estruturação do pensamento nesta análise, utilizada em muitos modelos de decisão multicritério e em especial nos modelos MAVT e MAUT (KEENEY; RAIFFA, 1976).

Franco e Montibeller (2009) explanam em detalhe as duas abordagens clássicas para estruturação de uma árvore de valores, que são “de cima para baixo” (*top-down*), alinhada com o VFT, e “de baixo para cima” (*bottom-up*), que segue o AFT. Os autores também ressaltaram as propriedades imprescindíveis que os objetivos de uma árvore de valores devem possuir, eles devem ser:

- *Essenciais:* consideração de todos os objetivos organizacionais essenciais para a decisão;
- *Entendíveis*: clareza para todos os envolvidos na decisão, sem ambiguidades;
- *Operacionais*: capacidade de medição do desempenho das alternativas de decisão;
- *Não-redundantes*: não podem existir dois objetivos para o mesmo fim;
- *Concisos*: o menor número possível de objetivos deve ser escolhido;

- *Preferencialmente independentes*: medição de um objetivo de forma independente dos demais, para que seja possível agregar os desempenhos parciais de forma simples e direta.

3.1.2 Definição das alternativas

A definição das alternativas é uma atividade crucial dentro do desenvolvimento da solução para o problema, pois se as alternativas forem fracas e mal formuladas a decisão final terá pouco valor, independente de quão sofisticado e bem-feito for o modelo de decisão formulado (FRANCO; MONTIBELLER, 2009).

No caso de uma seleção de fornecedores, que é o problema proposto, as alternativas são as opções de fornecimento disponíveis, que são geradas pelos próprios fornecedores. Para garantir que as informações sejam consistentes e criem boas alternativas de solução, é importante que todas as considerações do edital de fornecimento sejam bem explicadas, de acordo com o modelo de decisão gerado, e que os fornecedores convidados a participar sejam capazes de atender aos requisitos solicitados, além de sanar dúvidas durante o processo. É igualmente essencial que seja feita pelos compradores uma análise crítica das propostas apresentadas, para verificação da coerência dos dados apresentados e se for o caso correção dos mesmos ou até mesmo a não consideração de uma proposta incoerente das alternativas de decisão para que esta não prejudique a seleção das demais.

3.1.3 Definição das constantes de escala

A priorização dos objetivos da decisão é feita por meio da atribuição de constantes de escala – também chamadas de pesos (da tradução do inglês *weights*) – a cada atributo, sendo importante ressaltar que um peso mais elevado não significa maior importância do atributo na decisão. Para auxiliar que este equívoco seja evitado, os

parâmetros máximos e mínimos de cada atributo devem ser explicitados no momento de fazer as compensações, conforme explicado por Montibeller e Franco (2007), na descrição do procedimento de *swing-weights*.

O procedimento de *swing-weights* é um dos mais simples e efetivos para ser aplicado em grupos, avaliando a melhoria dos atributos, do nível mais baixo ao nível mais alto de cada um (GOODWIN; WRIGHT, 2004). A dinâmica é: imaginando um cenário onde a empresa possui os piores resultados em cada um dos atributos previamente selecionados, e pudesse ser escolhido somente um deles para melhoria, qual seria o primeiro a ser escolhido? Este atributo, por exemplo o "atributo A", recebe então o valor de 100, como mostra a figura 7(a), que representa uma melhoria do pior para o melhor resultado dos parâmetros daquele atributo. Em seguida, ignorando momentaneamente a existência do "atributo A", inicialmente escolhido, faz-se a mesma pergunta em relação aos atributos restantes: caso somente um pudesse ser melhorado, qual seria escolhido? E considerando que a melhoria do "atributo A" vale 100, quanto vale a melhoria deste outro atributo (por exemplo, "C")? No exemplo ilustrado na Figura 7(b), vale 60. Esta dinâmica é seguida para todos os atributos, chegando-se na pontuação completa conforme a Figura 7(c). Então estas pontuações são normalizadas de forma a criar as constantes de escala que serão usadas para cada atributo no modelo.

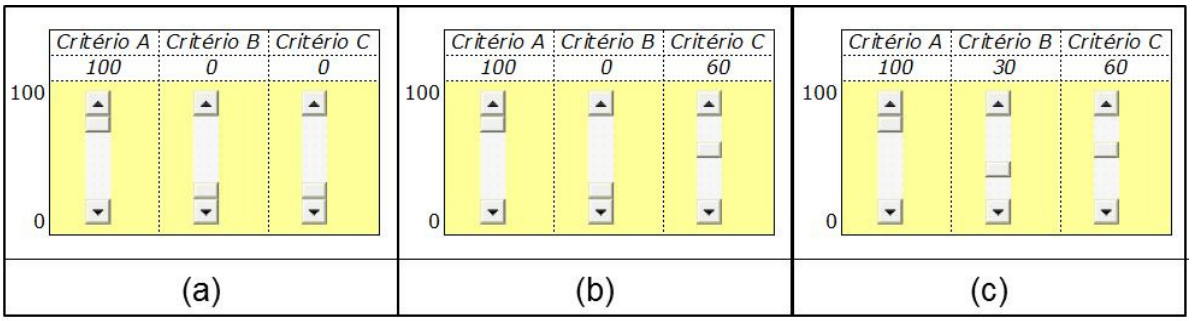


Figura 7 – Evolução do método de *swing-weights*

Phillips e Bana e Costa (2007) utilizam o método de *swing-weights* com uma pequena variação; orientando os participantes a não compartilharem seus julgamentos sobre os pesos relativos em um primeiro momento, para que depois o grupo chegue a um consenso com o auxílio do facilitador, que encoraja as discussões a partir das percepções de maior e menor valor para cada constante de escala. Os autores sugerem também que estas visões extremas sejam registradas

para uso posterior na análise de sensibilidade dos resultados obtidos.

3.1.4 Definição das funções de valor

Cada atributo estabelecido deve possuir uma função de valor, que mostra como o valor do atributo se comporta em relação ao seu desempenho. A criação das funções de valor é um modo de explicitar as preferências do cliente sobre as consequências e as compensações de cada escolha na decisão. Não há valores certos ou errados, o que deve ser compreendido e representado na função de valor é o comportamento dos decisores em relação às preferências, que é feito através de julgamentos de valor sobre as possíveis consequências do problema (KEENEY, 1982).

A função de valor mede o valor relativo entre as performances possíveis para o atributo, modelando as prioridades do cliente para a decisão de acordo com seus valores percebidos. Elas podem ser estabelecidas por dois métodos tradicionais, chamados *bi-secção*, que pode ser aplicado somente em atributos quantitativos, e *pontuação direta*, que pode ser aplicado tanto em atributos quantitativos como em qualitativos. No método da bi-secção os decisores identificam pontos médios na função de valor de acordo com os níveis de amplitude desejados para cada atributo; enquanto no método da pontuação direta o grupo avalia precisamente os níveis relevantes de cada atributo (GOODWIN; WRIGHT, 2004; MONTIBELLER; FRANCO, 2007).

Apesar das funções de valor geradas pelos métodos propostos por Keeney (1982) serem não lineares, elas podem ser modeladas para otimização como funções lineares por trechos com auxílio de variáveis binárias, e assim podem ser aplicadas no modelo de programação linear inteira (WINSTON; VENKATARAMANAN, 2003).

3.2 Modelagem matemática

De acordo com Pidd (1999), os modelos em pesquisa operacional têm dois usos principais: explorar as possíveis consequências para ações, antes que estas sejam efetuadas na prática; e ser parte de um sistema computacional para suportar a tomada de decisão. Os modelos criados e utilizados neste trabalho tem foco primário no segundo tema, sendo parte essencial da gestão da organização que os utiliza. No entanto, o uso de modelos não significa a substituição de intervenção humana, que deve sempre analisar ponderadamente os resultados obtidos.

A existência de propriedades sistêmicas requer a utilização de modelagem por otimização para análise do problema e é extensamente encontrada na modelagem clássica de otimização monocriterial, como a minimização de custos totais (MONTIBELLER; YOSHIZAKI, 2011).

São propostos três tipos de modelagem matemática para o problema: a otimização monocriterial, que é aplicada individualmente a cada atributo; a otimização multicriterial, que une todos os atributos em uma mesma função objetivo; e a otimização multicriterial combinatória, que complementa a modelagem anterior considerando ainda as complementariedades entre os itens, gerando economias nos processo. Os três modelos são apresentados a seguir.

3.2.1 Otimização monocriterial

O modelo de otimização considerando somente um atributo, como por exemplo Custo, é mostrado abaixo. Os índices relacionados neste modelo são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Descrição dos índices utilizados no modelo monocriterial

Índice	Descrição	Intervalo	Conjunto
I	Item que será comprado	i = 1,2,...,I	i $\in N$
J	Fornecedor considerado	j = 1,2,...,J	j $\in N$

As variáveis de decisão são aquelas que serão otimizadas no modelo, e estão relacionadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Descrição das variáveis de decisão utilizadas no modelo monocriterial

Variável	Descrição	Unidade
x_{ij}	Contratação do fornecedor j para o item i (escolha binária: 1 se é escolhido, 0 caso contrário)	-
y_j	Variável auxiliar para contagem de fornecedores (escolha binária: 1 se é escolhido, 0 caso contrário)	-

Os parâmetros e constantes são entradas do modelo e não sofrem mudanças quando o mesmo é otimizado. Eles são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Descrição dos parâmetros e constantes utilizados no modelo monocriterial

Parâmetro	Descrição	Unidade
C	Custo total de contratação	R$
c_{ij}	Valor do custo do item i, fornecido pelo fornecedor j	R$
Q	Número qualquer suficientemente grande em relação ao número de itens	-
N	Número máximo de fornecedores permitido	-
I	Conjunto de itens considerado no modelo: I = {1,2,...,I}	-
J	Conjunto de fornecedores considerado no modelo: J = {1,2,...,J}	-

Com o conhecimento das informações colocadas nas Tabelas 4, 5 e 6 acima, é possível descrever o modelo matemático de otimização considerando o Custo como único atributo a ser otimizado. A Equação 1 mostra a função objetivo, é que a minimização do Custo Total.

$$Min\ C = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} \cdot x_{ij} \tag{1}$$

As Equações 2 a 6 mostram as restrições do modelo. A Equação 2 indica a exclusividade do fornecimento, ou seja, cada item só pode ser fornecido por um fornecedor. Esta premissa foi adotada para este caso, porém é muito comum na

área de compras o estabelecimento de quotizações, que é quando um mesmo item é fornecido por mais de um fornecedor, de forma a garantir o abastecimento, porém aumentando a complexidade de desenvolvimento e gestão. Caso seja preferencial fazer uma quotização para algum item, deve-se alterar a restrição para maior ou igual (ou somente igual) a 2, somente no item em questão ou em todos do conjunto.

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \ \forall \ i \in I \tag{2}$$

A Equação 3 é a restrição do número máximo de fornecedores, poderia ter sido feita limitando-se o número mínimo ou com ambos os limites máximos e mínimos explícitos. A Equação 4 é auxiliar à contagem de fornecedores, e relaciona que se existe fornecimento para o item *i* pelo fornecedor *j*, o y_j será 1, caso contrário será zero. As Equações 5 e 6 indicam que as variáveis de decisão são binárias.

$$\sum_{j \in J} y_j \leq N \tag{3}$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq Q \cdot y_j, \forall \ j \in J \tag{4}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \tag{5}$$

$$y_j \in \{0,1\} \tag{6}$$

Neste exemplo não são consideradas as capacidades de cada fornecedor ou níveis mínimos de qualidade ou atendimento nas entregas, porém estas limitações também podem ser mapeadas nas restrições do modelo. O mesmo conjunto de equações pode ser aplicado a outros atributos, além do Custo, conforme for prioridade na escolha, alterando-se as constantes de entrada e adequando-se as restrições.

3.2.2 Otimização multicriterial

O modelo de otimização multicritério pode ser criado com o conhecimento dos atributos desejados e de interesse para o problema.

Os índices relacionados neste modelo são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Descrição dos índices utilizados no modelo muticritério

Índice	Descrição	Intervalo	Conjunto
I	Item que será comprado	i = 1,2,...,I	i $\in N$
J	Fornecedor considerado	j = 1,2,...,J	j $\in N$
K	Atributo considerado	k = 1,2,...,K	k $\in N$
M	Ponto de quebra da função de valor do atributo k	m = 1,2,...,n	m $\in N$

O "ponto de quebra", citado na Tabela 7, é o ponto em que ocorre a junção de dois trechos de funções lineares, onde a curva muda de angulação, e que torna a função não linear. Um exemplo de uma função com quatro pontos de quebra pode ser visto na Figura 8.

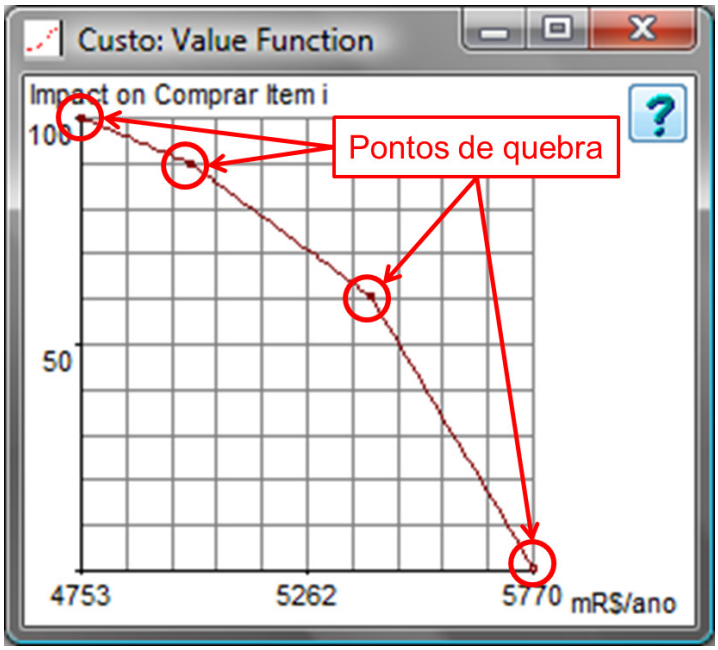


Figura 8 – Exemplo de ponto de quebra de uma função não linear, para modelagem como função linear por trechos

As variáveis de decisão, que serão otimizadas no modelo, estão relacionadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Descrição das variáveis de decisão utilizadas no modelo multicritério

Variável	Descrição	Unidade
x_{ij}	Contratação do fornecedor j para o item i (escolha binária: 1 se é escolhido, 0 caso contrário)	-
y_j	Variável auxiliar para contagem de fornecedores (escolha binária: 1 se é escolhido, 0 caso contrário)	-
z_{km}	Variável auxiliar para localização do ponto m na curva da função de valor	-
z_{kmi}	Variável auxiliar para localização do ponto m na curva da função de valor, para o item i	-
a_{km}	Variável auxiliar para identificação do ponto z_{km} em determinado trecho da curva da função de valor (escolha binária: 1 se é existe, 0 caso contrário)	-
a_{kmi}	Variável auxiliar para identificação do ponto z_{kmi} em determinado trecho da curva da função de valor do item i (escolha binária: 1 se é existe, 0 caso contrário)	-

Os parâmetros e constantes são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Descrição dos parâmetros e constantes utilizados no modelo multicritério

Parâmetro	Descrição	Unidade
V	Valor total da contratação determinada	%
w_k	Peso atribuído ao atributo k (a soma dos pesos de todos os atributos deve ser 1)	%
v_k	Valor atribuído ao atributo k	%
k_{ij}	Valor do atributo k para o item i, fornecido pelo fornecedor j	(dependente do atributo)
$f(k_m)$	Valor da função de valor do atributo k para o ponto k_m, para o conjunto	%
$f(k_{mi})$	Valor da função de valor do atributo k para o ponto k_{mi}, para o item i	%
k_m	Valor do atributo k no ponto de quebra m da curva, para o conjunto	(dependente do atributo)
k_{mi}	Valor do atributo k no ponto de quebra m da curva, para o item i	(dependente do atributo)
Q	Número qualquer suficientemente grande em relação ao número de itens	-
N	Número máximo de fornecedores permitido	-
I	Conjunto de itens considerado no modelo: $I = \{1,2,...,I\}$	-
J	Conjunto de fornecedores considerado no modelo: $J = \{1,2,...,J\}$	-
K	Valor total do atributo K para o conjunto escolhido	(dependente do atributo)
K_i	Valor total do atributo K para o item i escolhido	(dependente do atributo)
n	Número total de pontos de quebra da função de valor	

O modelo matemático de otimização multicritério é baseado em uma priorização entre os atributos participantes, o que pode ser visto na função objetivo mostrada abaixo, na Equação 7. A cada atributo é atribuído um valor, e a este é multiplicado o peso do atributo na decisão. Quando todos os atributos são preferencialmente independentes, ou seja, o desempenho de determinado atributo não interfere nos demais, eles podem ser agregados por uma soma ponderada simples (MONTIBELLER; YOSHIZAKI, 2011; MONTIBELLER; FRANCO, 2007). A somatória resulta no valor total da contratação, que é desejado se maximizar.

O valor máximo desta somatória é 1 pois há independência preferencial entre os atributos. Os atributos são preferencialmente independentes porque no caso, se há mudança no valor de um atributo qualquer, a ordem de preferência das consequências desta mudança não depende dos valores fixados para os demais atributos (KEENEY, 1992).

$$Max\ V = \sum_{k \in K} w_k \cdot v_k \tag{7}$$

As Equações 2 a 6, as mesmas já apresentadas no item anterior na modelagem monocriterial, impõem as restrições gerais ao modelo.

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \ \forall\ i \in I \tag{2}$$

$$\sum_{j \in J} y_j \leq N \tag{3}$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq Q \cdot y_j, \forall\ \ j \in J \tag{4}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \tag{5}$$

$$y_j \in \{0,1\} \tag{6}$$

As restrições específicas do modelo de otimização multicriterial são àquelas relacionadas a cada atributo considerado. Os atributos estão ligados no modelo através de sua função de valor, como pode ser visto na função objetivo (Equação 7), e há dois equacionamentos possíveis para a mensuração do valor de cada atributo, pois irão depender de como é feita a contabilização do atributo para o conjunto de itens, que é mostrada nas Equações 8 e 9.

No primeiro caso, Equação 8, o atributo é acumulativo, ou seja, tem característica de somatória, para se analisar o conjunto deve se somar os valores de cada item participante. Um exemplo deste tipo de atributo é o Custo, pois para adquirir dois itens distintos deve ser pago o valor somado dos dois, acumulando os valores.

$$K = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} k_{ij} \cdot x_{ij} \tag{8}$$

Na Equação 9, trata-se de um atributo não-acumulativo, ou seja, que tem característica de gargalo, o pior desempenho do conjunto irá ser a referência para todos os demais. Neste caso, por exemplo o tempo decorrido para alguma atividade, basta se analisar o caso mais crítico, que os restantes já ocorreram em paralelo dentro do maior intervalo.

$$K = \max\left[\sum_{j \in J} k_{ij} \cdot x_{ij}\right], \forall\ i \in I \tag{9}$$

As restrições impostas no modelo matemático por cada um dos atributos contemplam a linearização das funções de valor dos mesmos, cujas formulações são mostradas abaixo. Para linearização dos atributos acumulativos (Equação 8), o conjunto de itens é analisado de maneira global (análise da soma do conjunto e não de cada item separadamente), conforme Equações 10 a 16.

$$v_k = z_{k1} \cdot f(k_1) + z_{k2} \cdot f(k_2) + \ldots + z_{kn} \cdot f(k_n) \tag{10}$$

$$z_{k1} \leq a_{k1},\ \ z_{k2} \leq a_{k1} + a_{k2},\ \ldots\ ,\ \ z_{kn-1} \leq a_{kn-2} + a_{kn-1},\ \ z_{kn} \leq a_{kn-1} \tag{11}$$

$$a_{k1} + a_{k2} + \ldots + a_{kn-1} = 1 \tag{12}$$

$$z_{k1} + z_{k2} + \ldots + z_{kn} = 1 \tag{13}$$

$$K = z_{k1} \cdot k_1 + z_{k2} \cdot k_2 + \ldots + z_{kn} \cdot k_n = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} k_{ij} \cdot x_{ij} \tag{14}$$

$$z_{km} \geq 0 \tag{15}$$

$$a_{km} \in \{0,1\} \tag{16}$$

Para linearização dos atributos não-acumulativos (Equação 9), o conjunto de itens é analisado como máximo de valores, e as equações de linearização precisam ser aplicadas para cada item, conforme indicado pelas Equações 17 a 25. As Equações 17 e 18 mostram duas formas de mensuração do valor para este tipo de atributo. Na Equação 17 é escolhida como valor total a menor função de valor entre todos os itens, ou seja, aquela que tem o pior desempenho, que é o gargalo do projeto. Já na Equação 18, a função resultante é uma média dos valores de cada item, e é aplicada a itens que são independentes, ou seja, o pior desempenho de um não afeta no desempenho do outro, logo foram modelados como uma média, pois não cabe aqui serem somados.

$$v_k = \min\left[z_{k1i} \cdot f\left(k_{1i}\right) + z_{k2i} \cdot f\left(k_{2i}\right) + \ldots + z_{kni} \cdot f\left(k_{ni}\right)\right] \; ; \; \forall \; i \in I \tag{17}$$

$$v_k = \sum_{i \in I} \left[z_{k1i} \cdot f\left(k_{1i}\right) + z_{k2i} \cdot f\left(k_{2i}\right) + \ldots + z_{kni} \cdot f\left(k_{ni}\right)\right] \Big/ \sum_{i \in I} i \tag{18}$$

As equações a seguir contemplam o restante das restrições de linearização da função de valor para os atributos não-acumulativos.

$$z_{k1i} \le a_{k1i}, \; z_{k2i} \le a_{k1i} + a_{k2i}, \; \ldots \; , \; z_{kni-1} \le a_{kni-2} + a_{kni-1}, \; z_{kni} \le a_{kni-1}; \; \forall \; i \in I \tag{19}$$

$$a_{k1i} + a_{k2i} + \ldots + a_{kni-1} = 1; \; \forall \; i \in I \tag{20}$$

$$z_{k1i} + z_{k2i} + \ldots + z_{kni} = 1; \; \forall \; i \in I \tag{21}$$

$$K_i = z_{k1i} \cdot k_{1i} + z_{k2i} \cdot k_{2i} + \ldots + z_{kni} \cdot k_{ni}; \; \forall \; i \in I \tag{22}$$

$$K = \max\left[K_i\right] = \max\left[\sum_{j \in J} k_{ij} \cdot x_{ij}\right], \forall \; i \in I \tag{23}$$

$$z_{kmi} \ge 0 \tag{24}$$

$$a_{kmi} \in \{0,1\} \tag{25}$$

3.2.3 Otimização multicriterial combinatória

Esta é a modelagem final objetivo deste trabalho. A partir do modelo multicritério desenvolvido no item 3.2.2, adiciona-se a análise combinatória onde cada fornecedor pode propor conjuntos de itens com sinergia de fornecimento, chamados aqui de "pacotes", nos quais há condições diferenciadas em comparação à aquisição de um item individual. Para tanto, são relacionados novos índices neste modelo, mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Descrição dos índices utilizados no modelo muticritério combinatório

Índice	Descrição	Intervalo	Conjunto
I	Item que será comprado	i = 1,2,...,I	i $\in N$
J	Fornecedor considerado	j = 1,2,...,J	j $\in N$
P	Pacote oferecido pelo fornecedor	p = 1,2,...,P	p $\in N$
K	Atributo considerado	k = 1,2,...,K	k $\in N$
M	Ponto de quebra da função de valor do atributo k	m = 1,2,...,n	m $\in N$

As novas variáveis de decisão com a adição do combinatório estão na Tabela 11.

Tabela 11 – Descrição das variáveis de decisão utilizadas no modelo multicritério combinatório

Variável	Descrição	Unidade
x_j^p	Contratação do fornecedor j para o pacote p (escolha binária: 1 se é escolhido, 0 caso contrário)	-
x_{ij}	Contratação do fornecedor j para o item i (escolha binária: 1 se é escolhido, 0 caso contrário)	-
y_j	Variável auxiliar para contagem de fornecedores (escolha binária: 1 se é escolhido, 0 caso contrário)	-
z_{km}	Variável auxiliar para localização do ponto m na curva da função de valor	-
z_{kmi}	Variável auxiliar para localização do ponto m na curva da função de valor, para o item i	-
a_{km}	Variável auxiliar para identificação do ponto z_{km} em determinado trecho da curva da função de valor (escolha binária: 1 se é existe, 0 caso contrário)	-
a_{kmi}	Variável auxiliar para identificação do ponto z_{kmi} em determinado trecho da curva da função de valor do item i (escolha binária: 1 se é existe, 0 caso contrário)	-

Os parâmetros e constantes são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Descrição dos parâmetros e constantes utilizados no modelo multicritério combinatório

Parâmetro	Descrição	Unidade
V	Valor total da contratação determinada	%
w_k	Peso atribuído ao atributo k (a soma dos pesos de todos os atributos deve ser 1)	%
v_k	Valor atribuído ao atributo k	%
l_{ij}^{p}	Alocação do item *i* pelo fornecedor *j*, conforme pacote *p* (binário, 1 se *i* é proposto em *p* por *j*, 0 caso contrário)	-
k_{ij}	Valor do atributo k para o item i, fornecido pelo fornecedor j	(dependente do atributo)
k_j^{p}	Valor do atributo k para o pacote p, fornecido pelo fornecedor j	(dependente do atributo)
$f(k_m)$	Valor da função de valor do atributo k para o ponto k_m, para o conjunto	%
$f(k_{mi})$	Valor da função de valor do atributo k para o ponto k_{mi}, para o item i	%
k_m	Valor do atributo k no ponto de quebra m da curva, para o conjunto	(dependente do atributo)
k_{mi}	Valor do atributo k no ponto de quebra m da curva, para o item i	(dependente do atributo)
Q	Número qualquer suficientemente grande em relação ao número de itens	-
N	Número máximo de fornecedores permitido	-
I	Conjunto de itens considerado no modelo: I = {1,2,...,I}	-
J	Conjunto de fornecedores considerado no modelo: J = {1,2,...,J}	-
P	Conjunto de pacotes considerado no modelo: P = {1,2,...,P}	-
K	Valor total do atributo K para o conjunto escolhido	(dependente do atributo)
K_i	Valor total do atributo K para o item i escolhido	(dependente do atributo)
n	Número total de pontos de quebra da função de valor	

A função objetivo do modelo de otimização multicritério combinatório é a mesma do modelo sem combinatório, como mostrado na Equação 7 repetida a seguir.

$$Max\ V = \sum_{k \in K} w_k \cdot v_k \tag{7}$$

No entanto, parte das restrições será diferente para adequação ao modelo combinatório, com a inclusão dos pacotes de fornecimento, como mostram as

Equações 26 e 27, abaixo, que substituem as Equações 2 e 5 apresentadas anteriormente.

$$\sum_{j \in J} \sum_{p \in P} a_{ij}^{p} \cdot x_{j}^{p} = 1, \ \forall \ i \in I \tag{26}$$

$$x_{j}^{p} \in \{0,1\} \tag{27}$$

As demais restrições gerais do modelo multicriterial combinatório são repetidas a seguir nas Equações 3, 4 e 6.

$$\sum_{j \in J} y_{j} \leq N \tag{3}$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq Q \cdot y_{j}, \forall \ j \in J \tag{4}$$

$$y_{j} \in \{0,1\} \tag{6}$$

As restrições específicas do modelo de otimização multicriterial combinatório diferem apenas na forma de cálculo do atributo propriamente dito, como mostram as Equações 28 e 29 (que substituem as Equações 8 e 9) que envolvem os pacotes de fornecimento para o atributo acumulativo e o não-acumulativo, respectivamente.

$$K = \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} k_{j}^{p} \cdot x_{j}^{p} \tag{28}$$

$$K = \max \left[\sum_{j \in J} \sum_{p \in P} k_{j}^{p} \cdot x_{j}^{p} \right], \forall \ i \in I \tag{29}$$

Desta forma, grande parte das restrições específicas de cada atributo são mantidas idênticas às colocadas para o modelo multicriterial não-combinatório, mostradas a seguir, diferindo-se apenas as equações 30 e 31 (substituindo as Equações 14 e 23) de acordo com o apresentado nas Equações 28 e 29 para os atributos acumulativos e não-acumulativos.

Para atributos acumulativos:

$$v_k = z_{k1} \cdot f(k_1) + z_{k2} \cdot f(k_2) + ... + z_{kn} \cdot f(k_n) \tag{10}$$

$$z_{k1} \leq a_{k1},\ \ z_{k2} \leq a_{k1} + a_{k2},\ ...\ ,\ \ z_{kn-1} \leq a_{kn-2} + a_{kn-1},\ \ z_{kn} \leq a_{kn-1} \tag{11}$$

$$a_{k1} + a_{k2} + ... + a_{kn-1} = 1 \tag{12}$$

$$z_{k1} + z_{k2} + ... + z_{kn} = 1 \tag{13}$$

$$z_{km} \geq 0 \tag{15}$$

$$a_{km} \in \{0,1\} \tag{16}$$

$$K = z_{k1} \cdot k_1 + z_{k2} \cdot k_2 + ... + z_{kn} \cdot k_n = \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} k_j^p \cdot x_j^p \tag{30}$$

Para atributos não-acumulativos:

$$v_k = \min[z_{k1i} \cdot f(k_{1i}) + z_{k2i} \cdot f(k_{2i}) + ... + z_{kni} \cdot f(k_{ni})]\ ;\ \forall\ i \in I \tag{17}$$

$$\text{Ou}\quad v_k = \sum_{i \in I} [z_{k1i} \cdot f(k_{1i}) + z_{k2i} \cdot f(k_{2i}) + ... + z_{kni} \cdot f(k_{ni})] \Big/ \sum_{i \in I} i \tag{18}$$

$$z_{k1i} \leq a_{k1i},\ \ z_{k2i} \leq a_{k1i} + a_{k2i},\ ...\ ,\ \ z_{kni-1} \leq a_{kni-2} + a_{kni-1},\ \ z_{kni} \leq a_{kni-1};\ \forall\ i \in I \tag{19}$$

$$a_{k1i} + a_{k2i} + ... + a_{kni-1} = 1;\ \forall\ i \in I \tag{20}$$

$$z_{k1i} + z_{k2i} + ... + z_{kni} = 1;\ \forall\ i \in I \tag{21}$$

$$K_i = z_{k1i} \cdot k_{1i} + z_{k2i} \cdot k_{2i} + ... + z_{kni} \cdot k_{ni};\ \forall\ i \in I \tag{22}$$

$$z_{kmi} \geq 0 \tag{24}$$

$$a_{kmi} \in \{0,1\} \tag{25}$$

$$K = \max[K_i] = \max\left[\sum_{j \in J} \sum_{p \in P} k_j^p \cdot x_j^p\right], \forall\ i \in I \tag{31}$$

No próximo capítulo será vista a aplicação prática dos modelos matemáticos apresentados de otimização monocriterial, otimização multicriterial e otimização multicriterial combinatória ao estudo de caso proposto neste trabalho.

4 APLICAÇÃO À INDÚSTRIA COSMÉTICA

O caso que motiva este trabalho é a seleção de fornecedores de materiais produtivos (embalagens) para cosméticos, com base no problema real de uma grande indústria brasileira do setor. No entanto, conforme já dito anteriormente, a aplicação conceitual da modelagem proposta enquadra-se para qualquer tipo de fornecimento, tanto de produtos como de serviços, adaptando-se os parâmetros conforme as necessidades do caso.

Para melhor entendimento do caso, primeiramente é apresentado um panorama da indústria cosmética, com foco no Brasil, para posterior descrição do problema e aplicação da metodologia proposta para sua solução.

4.1 Particularidades da indústria cosmética

A indústria cosmética brasileira, atualmente a terceira maior do mundo atrás de Estados Unidos e Japão, movimentou em 2010 R$ 27,3 bilhões[3] e é um segmento industrial de crescimento acelerado, como mostra a Figura 9. Pode ser considerada uma das impulsionadoras da economia no país, visto o comportamento do setor durante a crise econômica de 2008/2009 quando foi uma das únicas indústrias a apresentar índices de crescimento, o que pode ser visto no comparativo da Figura 10, que apresenta as evoluções do setor cosmético versus a indústria geral brasileira e o PIB do país. É também uma indústria incentivadora de pesquisa e tecnologia, dado o alto valor agregado de seus produtos, estimulando o desenvolvimento em toda cadeia de suprimentos.

[3] Valor (sem impostos) divulgado pela ABIHPEC (Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos), para o ano de 2010.

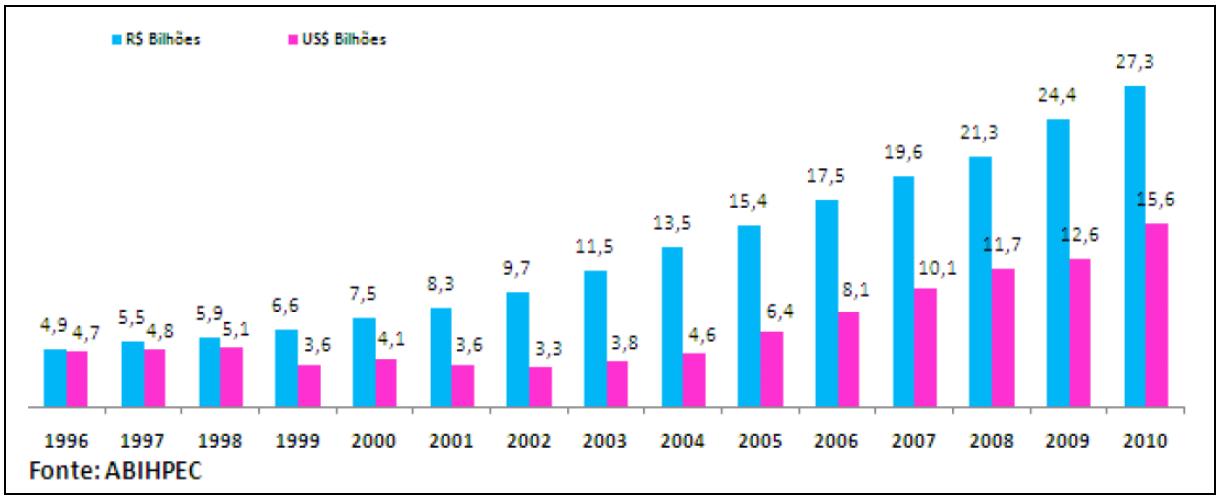


Figura 9 – Evolução do faturamento (livre de impostos) da indústria cosmética brasileira nos últimos 15 anos

A observação da Figura 10 mostra que nos últimos 15 anos, sem exceção, o setor cosmético apresentou crescimento significativamente maior do que a indústria brasileira e o PIB do país, com destaque para os anos de 1998 e mais recentemente 2009, em que o setor se destacou com índices de crescimento em torno de 10% enquanto houve deflação no restante da economia.

VARIAÇÃO ANUAL – EM PORCENTAGEM			
ANO	**PIB**	**INDÚSTRIA GERAL**	**SETOR Deflacionado**
1996	2,7	3,3	17,2
1997	3,3	4,7	13,9
1998	0,2	-1,5	10,2
1999	0,8	-2,2	2,8
2000	4,3	6,6	8,8
2001	1,3	1,6	10,0
2002	2,7	2,7	10,4
2003	1,1	0,1	5,0
2004	5,7	8,3	15,0
2005	3,2	3,1	13,5
2006	4,0	2,8	15,0
2007	6,1	6,0	9,4
2008	5,2	3,1	5,4
2009	-0,6	-7,4	9,8
2010	7,5	10,5	10,7
Acumulado últimos 15 anos	**59,0**	**48,8**	**341,3**
Médio Composto últimos 15 anos	**3,1**	**2,7**	**10,4**

FONTE: IBGE - Banco Central – ABIHPEC- Deflator: Índice IPC FIPE Higiene e Beleza

Figura 10 – Comparativo da variação do crescimento do Brasil, da indústria brasileira e da indústria cosmética brasileira, nos últimos 15 anos

Os fatores destacados pela Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos (ABIHPEC), como razão do crescimento apresentado são: o constante lançamento de novos produtos que movimentam o mercado, a maior participação da mulher brasileira neste mercado de trabalho e o aumento da produtividade com a utilização de tecnologia no setor, fazendo com que os aumentos de preço dos cosméticos fossem menores do que a inflação geral do país no período, como mostra o quadro da Figura 11, que ilustra as variações de preços nos últimos 5 anos.

VARIAÇÃO ANUAL – EM PORCENTAGEM					
ANO	Desvalorização Cambial Média	FGV	FIPE		
		Índice Geral De Preços	Índice De Preços Ao Consumidor	Índice De Preços Higiene	Índice De Preços Beleza
2006	-9,5	3,8	2,6	-0,8	1,8
2007	-10,9	7,9	4,4	2,0	1,6
2008	-6,0	9,8	6,2	5,9	3,7
2009	6,2	-1,4	3,7	2,1	2,4
2010	-9,4	11,3	6,4	1,5	4,3
Acumulado últimos 5 anos	**-27,1**	**34,9**	**25,5**	**11,1**	**14,6**
Médio Composto últimos 5 anos	**-6,1**	**6,2**	**4,6**	**2,1**	**2,8**

FONTE: ABIHPEC, Fundação Getúlio Vargas, Fundação Instituto de Pesquisa Econômicas da Universidade de São Paulo

Figura 11 – Comparativo da variação de preços no Brasil, destacando os produtos de higiene e de beleza, nos últimos 5 anos

No Brasil existem atualmente 1.659 empresas atuantes no mercado de higiene pessoal, perfumaria e cosméticos, sendo que 73% do mercado é dominado por 20 empresas de grande porte (faturamento acima de R$ 100 milhões). A competitividade deste mercado torna a inovação dos produtos, tanto em formulações quanto em embalagens, imprescindível para motivar a compra pelo consumidor, que tem uma ampla gama de opções a seu alcance. Isto faz com que mesmo produtos de sucesso sejam constantemente reformulados, e consequentemente sua vida útil seja breve. As embalagens são as que mais sofrem atualizações, e seu tempo de prateleira gira em torno de três anos.

Os fornecedores de matérias primas e embalagens para cosméticos abrangem desde grandes oleoquímicas e petroquímicas de base até empresas fabricantes de

aplicadores de maquiagem e fragrâncias customizadas. Há uma grande gama de categorias de compras, cada qual com suas exigências e características de mercado, porém a troca de fornecedor de um insumo é uma atividade complexa para todas elas. Se após lançar um novo produto for necessário trocar de fornecedor, pois o atual não atende com a qualidade ou o prazo contratados, os principais empecilhos encontrados são a viabilidade de tempo e de investimentos financeiros, isso considerando que existe capacidade tecnológica em outros competidores no mercado. Tempo, pois é necessário que o novo fornecedor, juntamente com a empresa (demandando também recursos internos), vivencie toda fase de desenvolvimento e testes do produto, o que implica em despesas financeiras, além dos investimentos em maquinário e ferramentais que podem ser exigidos do novo fornecedor e também do cliente, no caso de exclusividade. E há o aumento do custo interno de estocagem devido ao planejamento logístico necessário para prevenir o desabastecimento do insumo no período de transferência de fornecedor. Portanto, a escolha do fornecedor certo no início de um novo projeto é um ponto crucial de sucesso no desenvolvimento do mesmo.

A competitividade existente no mercado cosmético faz com que exista uma grande variedade de produtos e marcas. Para chamar a atenção do consumidor, é necessário que exista uma diferenciação do produto, primeiramente da embalagem e depois da formulação, para que ele seja considerado melhor que os demais e seja escolhido. Desta forma, são requeridas muitas embalagens e matérias-primas distintas, que exigem flexibilidade tanto dos fornecedores como do próprio cliente, influenciando os lotes econômicos de produção. Os volumes demandados de cada variante do produto também são menores, como por exemplo ao se fabricar oito fragrâncias de um creme hidratante ao invés de duas. Desta forma, a opção de quotização (um mesmo item comprado de mais de um fornecedor) não é atrativa economicamente, pois perde-se poder de negociação com todos os fornecedores envolvidos – salvo o caso de produtos com alta demanda que, mesmo o volume sendo dividido, ainda é suficientemente elevado para ser atrativo.

Outro fator que traz complexidade ao processo de abastecimento dos insumos é a variabilidade e incerteza da demanda, característica intrínseca dos produtos inovadores, e que está geralmente relacionada a altas margens de contribuição. Primeiramente, a empresa deve aceitar a variabilidade inerente ao processo, para então poder contorná-la aumentando a flexibilidade da cadeia de suprimentos, entre

outras estratégias, para ser capaz de levar respostas rápidas ao mercado e garantir o pioneirismo e competitividade (FISHER, 1997).

Com estas particularidades colocadas, é de fundamental importância para as empresas do ramo que exista um método fundamentado e flexível de acordo com as prioridades de cada projeto, para que o processo de seleção de fornecedores seja o mais assertivo possível.

4.2 Caso escolhido para estudo

O problema escolhido para este trabalho é a seleção de fornecedores para embalagens plásticas de uma nova linha de produtos cosméticos. São oito novos itens entre frascos, potes e tampas para os quais é feita uma concorrência com cinco fornecedores capazes de fabricar todos os itens. Será avaliado o conjunto da aquisição de todos os itens, ou seja, eles não serão analisados individualmente, e todo projeto deverá ser lançado ao mesmo tempo. A Figura 12 ilustra uma linha de cosméticos existente no mercado, a fim de exemplificar a variedade de tipos de embalagens presente no tipo de estudo apresentado.

Figura 12 – Exemplo de linha de produtos cosméticos (somente ilustrativo)

Para delimitação do caso, considerou-se que todos os fornecedores envolvidos no processo de seleção são incumbentes, já fornecem para a empresa cliente. Novos entrantes também podem ser avaliados dentro da modelagem proposta, contudo

foram desconsiderados para o problema aqui apresentado devido ao risco de implantação em um projeto de grande porte como o exemplificado.

É permitido que cada fornecedor submeta dois tipos de proposta: para um item individual ou para um conjunto de itens, sendo que neste caso (leilão combinatório) deve haver algum benefício para aquisição do conjunto. Para o problema em questão, um desconto financeiro e uma redução na emissão de GEE são concedidos para o pacote, em relação aos itens individuais. A escolha de formação dos pacotes é feita por cada fornecedor, que tem conhecimento das sinergias de seu processo para propor pacotes eficientes.

Outra restrição imposta ao modelo é a exclusividade de fornecimento; os itens não podem ser quotizados, desta forma cada item só pode ser fornecido por um único fornecedor. O número máximo de fornecedores permitido também é um parâmetro do modelo e deve ser estabelecido de acordo com os objetivos da empresa. Quanto maior o número de fornecedores escolhido, mais complexa é a gestão logística dos mesmos e também o esforço para o desenvolvimento do produto (antes de seu lançamento), pois esta etapa é feita em conjunto com cada fornecedor escolhido. No entanto, quanto menor o número de fornecedores, maior o risco de desabastecimento devido à concorrência interna entre itens fabricados pelo mesmo equipamento no fornecedor e também devido a motivos de força maior que possam interromper o fornecimento.

O grupo envolvido na decisão do caso é multifuncional, composto pelas áreas de Suprimentos, Desenvolvimento de Embalagens, Planejamento e Controle Logístico, Engenharia de Fabricação e Marketing de Produto. É premissa que todas as pessoas participantes sejam capacitadas com conhecimento de suas respectivas áreas e do processo da empresa, e tenham autonomia para tomada de decisão consensual dentro do grupo, mesmo que esta decisão tenha que ser submetida a uma aprovação em instância superior.

Esta dissertação foi baseada em um caso real da indústria de cosméticos, com algumas adaptações para a aplicação acadêmica. Devido ao alto índice de inovação e ao dinamismo deste setor, e também por ser a primeira aplicação prática do modelo desenvolvido, não foi possível estruturar todos os passos da metodologia dentro do prazo de lançamento da linha. Portanto, os passos iniciais (até a fase de definição das constantes de escala) foram executados em conjunto com o grupo multifuncional supracitado e as fases finais do método foram desenvolvidas de

acordo com a abordagem especialista, com o conhecimento da autora. A Tabela 13, a seguir, mostra a diferença entre as abordagens especialista (*expert mode*) e através de um facilitador (*facilitate mode*), que podem ser utilizadas na condução da metodologia MCDA[4].

Tabela 13 – Características das abordagens especialista e por facilitador

	Abordagem	
	Especialista	***Facilitador***
Objetivo	Prover as soluções ótimas para o cliente.	Ajudar o cliente a entender profundamente o problema e estimulá-lo a prosseguir.
Formulação do problema	O problema deve ser formulado da forma mais precisa possível.	O problema deve ser estruturado com o grupo de patrocinadores, com auxílio do analista para construção do modelo.
Definição das métricas	O especialista define as métricas para avaliação da performance das alternativas, baseado na natureza do problema.	As métricas devem refletir os objetivos e prioridades da organização, definidas pelo grupo de patrocinadores.
Coleta de dados	A coleta é extensa e de natureza quantitativa. O analista define quais informações devem ser levantadas.	A coleta pode ser extensa, mas inclui também dados qualitativos e informações das preferências. As prioridades da organização guiam a necessidade de informações.
Avaliação das opções	O modelo de decisão é resolvido pelo analista, que encontra as soluções ótimas para o problema.	A avaliação das opções é conduzida pelo facilitador junto ao grupo, de forma interativa. As consequências da adoção de cada opção são avaliadas pelo modelo e direciona as dicussões.
Apresentação dos resultados	As soluções ótimas encontradas são reportadas ao cliente através de um relatório detalhado, contendo todas as hipóteses consideradas.	Os resultados são mostrados de forma interativa para o grupo, que podem fazer simulações em outros cenários.
Comprometimento	O cliente deve se comprometer a implantar as soluções reportadas pelo analista.	O processo de chegar na solução em conjunto aumenta a chance do grupo implementar as ações de fato.

[4] As características listadas das abordagens especialista e por facilitador para condução do MCDA tiveram como referência as notas de aula do Professor Gilberto Montibeller, obtidas durante a disciplina Decisões Estratégicas em Sistemas Logísticos, do curso de Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos (Universidade de São Paulo), realizado em São Paulo, em 2009.

4.3 Aplicação da metodologia MCDA ao caso

A abordagem MAVT será aplicada conforme o método apresentado na Figura 6 (capítulo 3), sugerido por Franco e Montibeller (2009).

4.3.1 Definição da árvore de valores e dos atributos

Os atributos para análise das propostas são escolhidos devido à sua importância no processo de decisão da empresa em questão, de acordo com os objetivos fundamentais da empresa, através do grupo multifuncional formado pelas áreas de Suprimentos, Desenvolvimento de Embalagens, Planejamento e Controle Logístico, Engenharia de Fabricação e Marketing de Produto. Inicialmente foi feita uma reunião de *brainstorming* para elencar todas as características desejadas para as embalagens dos novos itens em questão, alinhadas com as metas da empresa. Nesta etapa também pode ser construído um mapa cognitivo, ao invés do *brainstorming*, conforme mostra Prado (2011).

O segundo passo foi então selecionar dentre a lista de características obtida quais aquelas que serão relevantes para a avaliação dos fornecedores, ou seja, quais serão diferenciadoras entre as propostas que serão recebidas. Nesta fase é importante distinguir as características que são obrigatórias para todos os fornecedores, como por exemplo a assinatura do contrato de fornecimento, que não deve ser considerada um atributo pois não diferenciará as alternativas já que todos os fornecedores devem atender a este pré-requisito. No caso de impasse entre opiniões das pessoas do grupo deve-se buscar o consenso através da discussão por argumentos racionais, e ter previamente decidido quem é a pessoa líder para esta decisão. Na empresa onde o caso foi aplicado, o responsável por Marketing de Produto é o líder para decidir quais são as características determinantes. A Figura 13 mostra o *brainstorming* realizado pelo grupo e, em destaque, as características elegidas para as novas embalagens.

Figura 13 – *Brainstorming* com características desejadas para as novas embalagens

Foram acordadas como essenciais as características econômicas, ambientais e logísticas. É importante ressaltar que aspectos legais e sociais não foram escolhidos por serem pré-requisitos de fornecimento, obrigatórios, ou por não serem diferenciadores, e não por menor importância em relação aos demais. As características destacadas da Figura 13 irão constituir a árvore de valores com os objetivos desejados pela empresa para o projeto em questão, que é ilustrada na Figura 14.

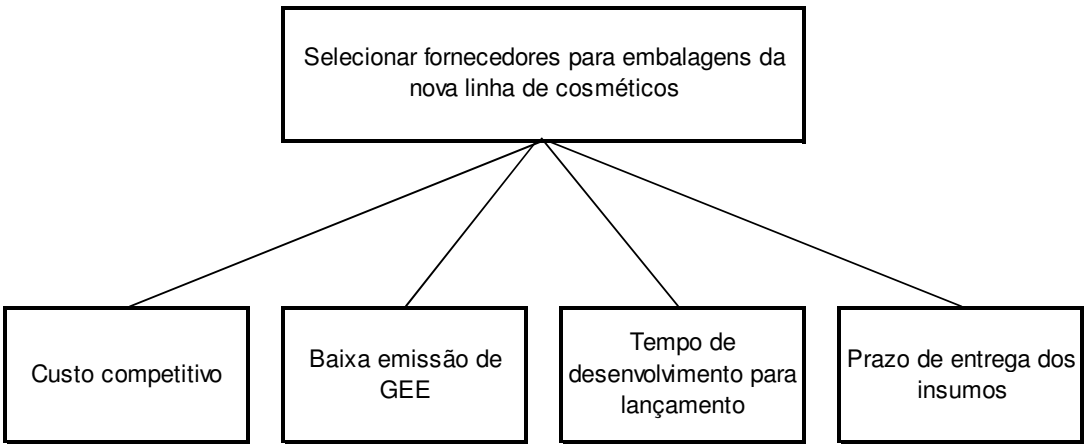


Figura 14 – Árvore de valores para o problema proposto

Foi verificado que os quatro objetivos possuem as propriedades identificadas por Franco e Montibeller (2009), explicadas na seção 3.2.1: são essenciais, entendíveis, operacionais, não-redundantes, concisos e preferencialmente independentes. Parte-se então para determinação dos atributos que avaliarão o cumprimento de cada um destes objetivos. Segue uma explicação sobre cada um deles em detalhe:

- **Custo total de contratação**: é a soma dos custos de cada item adquirido, considerando os volumes estimados do projeto, para um horizonte de um ano. O custo de cada item é dado pelo fornecedor na proposta comercial e deve considerar investimentos necessários em ferramentais. O Custo foi escolhido como um atributo para decisão porque é o principal direcionador de Suprimentos e fator indispensável em um processo de cotação.
- **Emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE)**: é a soma das emissões geradas de cada item adquirido, considerando os volumes estimados do projeto, para o horizonte de um ano. A emissão de cada item é calculada a partir de informações pedidas ao fornecedor na solicitação de cotação, e é baseada na energia de produção do item gasta pelo fornecedor e no frete para entrega. As Emissões de GEE foram escolhidas como um atributo porque a empresa está comprometida com metas de redução de emissões de GEE, incluindo aquelas contabilizadas pela cadeia estendida.
- **Prazo de Desenvolvimento**: é o tempo necessário para que o fornecedor desenvolva o novo item, antes de seu lançamento, contado da formalização do ganho do projeto até a validação do produto e aprovação por parte do cliente. O prazo de cada item é dado pelo fornecedor na proposta comercial, e o prazo do projeto é o mais crítico dentro do conjunto de itens, ou seja, o maior. O Prazo de Desenvolvimento foi escolhido como um atributo porque o tempo para lançar um produto no mercado é crítico no setor cosmético, bem como em qualquer ambiente competitivo de alta inovação.
- **Prazo de Entrega (*lead time*)**: é o tempo necessário para que o fornecedor entregue o item, a partir da colocação do pedido, de maneira rotineira após seu lançamento. O prazo de entrega de cada item é dado pelo fornecedor na proposta comercial, e o prazo de entrega do projeto é uma média dos prazos de todos os itens, pois se assume que não há dependência entre eles, ou seja, a

entrega de um item não tem relação com a entrega dos demais. O Prazo de Entrega foi escolhido como um atributo porque sua gestão implica em redução de estoques e uma cadeia de suprimentos ágil, o que é vital para o sucesso do negócio.

É importante ressaltar que o Prazo de Desenvolvimento é totalmente independente do Prazo de Entrega, apesar de ambos tratarem de tempo. O Prazo de Desenvolvimento só tem impacto em uma única vez, e é o tempo decorrente pelo fornecedor para lançar o produto, englobando a confecção de um molde ou ferramental necessário para fabricação da embalagem, aquisição de um maquinário de montagem ou acabamento (pintura, decoração etc), contratação de mão-de-obra ou serviços terceirizados necessários e também o tempo para os testes requeridos para que o produto esteja pronto para produção em larga escala. Já o Prazo de Entrega, comumente chamado também de *lead time*, do inglês, é o tempo prometido pelo fornecedor para entrega de um lote de produção, e contempla o tempo de planejamento ("fila" de produções planejadas para início na manufatura), o tempo de fabricação de todos os processos pelos quais o material deve passar, e também o tempo de entrega até o cliente, caso a contratação seja do tipo *Cost, Insurance and Freight* (CIF), na qual a entrega é feita pelo fornecedor.

O atributo de qualidade, apesar de ser o mais popular nas abordagens de seleção de fornecedores encontradas na literatura (HO; XU; DEY, 2010), não foi escolhido como fator de decisão porque se admite que todos os fornecedores participantes tenham capacidade comprovada de atender às demandas de qualidade solicitadas (pois todos já fornecem para o cliente), portanto não é um fator diferenciador entre as propostas.

Os atributos podem ser classificados em três categorias que irão determinar a forma como são contabilizados no modelo matemático. A categorização dos atributos escolhidos para decisão é mostrada na Tabela 14.

Tabela 14 – Classificação dos atributos escolhidos

Atributo	Independência entre itens do mesmo projeto	Característica de contabilização	Contabilização no conjunto
Custo	Independente	O custo total é a soma dos custos de cada item escolhido	Somatória
Emissões de GEE	Independente	A emissão total é a soma das emissões de cada item escolhido	Somatória
Prazo de Desenvolvimento	Dependente	O prazo de desenvolvimento total é o tempo do item escolhido mais longo	Gargalo (máximo)
Prazo de Entrega	Independente	O *lead time* do item escolhido mais longo não interfere no *lead time* dos demais, porém piora o resultado do item	Gargalo (média)

A classificação da forma de contabilização do conjunto irá determinar as equações que serão utilizadas na modelagem, mostrada no item 4.4, no final deste capítulo.

4.3.2 Impactos das alternativas

Nesta seção são apresentados os dados das propostas feitas pelos fornecedores para concorrência no projeto, que são as alternativas de fornecimento existentes no problema. No edital ou no convite para participação da concorrência do projeto, são informados para os fornecedores todos os atributos pelos quais os mesmos serão avaliados, para que estes saibam quais são os parâmetros mais importantes na decisão para aquele cliente e como serão avaliados. Esta prática também traz clareza no momento da divulgação dos resultados e entendimento da escolha realizada pelos participantes, auxiliando o *feedback* realizado com os fornecedores que perderam para que estes reconheçam seus pontos a desenvolver e possam melhorar o desempenho em futuras concorrências.

Por se tratarem de informações confidenciais, todos os valores utilizados (custos, emissões de GEE, prazos de desenvolvimento, prazos de entrega e volumes) foram gerados aleatoriamente, porém com limites inferiores e superiores condizentes com a realidade do setor.

As informações sobre os itens do projeto em concorrência são concedidas no edital para os fornecedores, como especificações técnicas e de qualidade requeridas, capacidades mínimas de produção exigidas, tamanhos de lote, necessidade de estoque de segurança, vida útil esperada para o item e variações de volume

planejadas (volume de venda em períodos de promoção, volume de venda sem promoção, número de promoções programadas no ano e outras sazonalidades que impactam na demanda). Para este estudo de caso, a única informação concedida relevante para inclusão no modelo é o volume anual total estimado de vendas por item, que será utilizado para cálculo do custo total anual de contratação de cada item e também para cálculo das emissões totais anuais de GEE de cada item. Os volumes são colocados na Tabela 15.

Tabela 15 – Volume anual estimado para cada item

Item i	Volume (unidades/ano)
I1	706.647
I2	1.664.090
I3	608.730
I4	1.913.079
I5	1.930.334
I6	1.391.894
I7	1.371.239
I8	513.708

Lembrando que cada fornecedor pode apresentar uma proposta para cada item individual, mais duas propostas de combinações entre itens promovendo algum benefício entre eles, portanto cada fornecedor apresentou dez propostas de fornecimento. As propostas combinatórias são sugeridas por cada fornecedor, que verifica quais são as sinergias existentes em seu processo que podem trazer ganhos ao combinar determinados itens. Os itens que compõem cada proposta de cada fornecedor são mostrados nas Tabelas 16 a 20.

Tabela 16 – Alocação de itens por proposta do fornecedor 1 (*j*=1)

	Itens presentes em cada proposta – F1									
i \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
I1	1								1	
I2		1								
I3			1						1	
I4				1						1
I5					1					1
I6						1				1
I7							1			
I8								1		

Tabela 17 – Alocação de itens por proposta do fornecedor 2 (*j*=2)

	Itens presentes em cada proposta – F2									
i \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
I1	1								1	
I2		1								
I3			1						1	
I4				1						1
I5					1					1
I6						1				1
I7							1			1
I8								1		

Tabela 18 – Alocação de itens por proposta do fornecedor 3 (*j*=3)

	Itens presentes em cada proposta – F3									
i \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
I1	1									1
I2		1								1
I3			1						1	
I4				1					1	
I5					1					
I6						1				
I7							1			
I8								1	1	

Tabela 19 – Alocação de itens por proposta do fornecedor 4 (*j*=4)

	Itens presentes em cada proposta – F4									
i \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
I1	1								1	
I2		1							1	
I3			1							1
I4				1						1
I5					1					
I6						1				
I7							1			1
I8								1	1	

Tabela 20 – Alocação de itens por proposta do fornecedor 5 (*j*=5)

	Itens presentes em cada proposta – F5									
i \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
I1	1								1	
I2		1							1	
I3			1						1	
I4				1						1
I5					1					
I6						1				1
I7							1			1
I8								1	1	

Nas Tabelas 21 a 25, são encontrados os custos por milheiro de embalagem apresentados nas propostas de cada fornecedor (que remetem ao fornecimento dos

itens indicados nas Tabelas 16 a 20), bem como sua multiplicação pelos volumes da Tabela 15 resultando no custo anual de contratação de cada proposta por fornecedor, em milhares de reais.

Tabela 21 – Custo por milheiro e custo total anual para propostas do fornecedor 1 (*j*=1)

	Custos das propostas do Fornecedor 1									
i \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Custo por embalagem (R$/milheiro)	441,85	677,48	285,77	562,21	345,38	427,92	602,28	478,46	691,24	1202,0
Custo anual contratação (mil R$)	312,2	1127,4	174,0	1075,6	666,7	595,6	825,9	245,8	461,9	2104,1

Tabela 22 – Custo por milheiro e custo total anual para propostas do fornecedor 2 (*j*=2)

	Custos das propostas do Fornecedor 2									
i \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Custo por embalagem (R$/milheiro)	444,13	794,86	295,2	591,68	306,44	497,06	778,25	475,26	680,18	2064,8
Custo anual contratação (mil R$)	313,8	1322,7	179,7	1131,9	591,5	691,9	1067,2	244,1	454,1	3308,4

Tabela 23 – Custo por milheiro e custo total anual para propostas do fornecedor 3 (*j*=3)

	Custos das propostas do Fornecedor 3									
i \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Custo por embalagem (R$/milheiro)	446,85	726,63	295	502,71	391,44	498,62	635,68	591,36	1222,4	1091,3
Custo anual contratação (mil R$)	315,8	1209,2	179,6	961,7	755,6	694,0	871,7	303,8	1271,7	1418,2

Tabela 24 – Custo por milheiro e custo total anual para propostas do fornecedor 4 (*j*=4)

	Custos das propostas do Fornecedor 4									
i \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Custo por embalagem (R$/milheiro)	433,19	666,79	255,76	501,9	328,1	454,21	617,24	550,14	1485,1	1237,4
Custo anual contratação (mil R$)	306,1	1109,6	155,7	960,2	633,3	632,2	846,4	282,6	1528,5	1766,0

Tabela 25 – Custo por milheiro e custo total anual para propostas do fornecedor 5 (*j*=5)

	Custos das propostas do Fornecedor 5									
i \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Custo por embalagem (R$/milheiro)	438,96	728,25	268,63	526,12	371,11	402,46	750,65	513,98	1754,8	1427,4
Custo anual contratação (mil R$)	310,2	1211,9	163,5	1006,5	716,4	560,2	1029,3	264,0	1754,7	2206,6

As Emissões de GEE são calculadas pela empresa com base nos dados solicitados aos fornecedores sobre energia de transformação do item e frete utilizado para entrega do mesmo.

Nas Tabelas 26 a 30, de forma similar às Tabelas 21 a 25, há os valores por emissão de GEE de cada proposta oriundos da fabricação de cada embalagem por cada fornecedor, e o valor anual de Emissões de GEE nos mesmos parâmetros, considerando o volume total, em toneladas de CO_2 equivalente. Nas propostas combinatórias de mais de um item pode haver sinergia em relação à fabricação combinada que resulte em uma economia de emissões geradas, o que pode ser visto nas propostas de número 9 e 10 de cada fornecedor.

Tabela 26 – Emissões de GEE por milheiro e anuais para propostas do fornecedor 1 (*j*=1)

	Emissões de GEE das propostas do Fornecedor 1									
i \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Emissão por embalagem (kg CO_{2e}/mil)	368,8	428,1	450,2	259,0	379,4	217,2	440,5	281,2	778,1	812,8
Emissão anual (t CO_{2e})	260,6	712,4	274,1	495,5	732,3	302,3	604,0	144,4	507,9	1453,6

Tabela 27 – Emissões de GEE por milheiro e anuais para propostas do fornecedor 2 (*j*=2)

	Emissões de GEE das propostas do Fornecedor 2									
i \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Emissão por embalagem (kg CO_{2e}/mil)	202,4	452,2	324,2	465,7	287,5	395,7	267,3	321,7	500,2	1345,3
Emissão anual (t CO_{2e})	143,0	752,4	197,3	890,9	555,0	550,7	366,5	165,3	323,3	2245,0

Tabela 28 – Emissões de GEE por milheiro e anuais para propostas do fornecedor 3 (*j*=3)

	Emissões de GEE das propostas do Fornecedor 3									
i \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Emissão por embalagem (kg CO_{2e}/mil)	493,0	321,8	292,6	278,3	492,3	330,3	456,3	271,1	799,9	774,1
Emissão anual (t CO_{2e})	348,4	535,5	178,1	532,3	950,4	459,8	625,7	139,3	807,3	839,7

Tabela 29 – Emissões de GEE por milheiro e anuais para propostas do fornecedor 4 (*j*=4)

	Emissões de GEE das propostas do Fornecedor 4									
i \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Emissão por embalagem (kg CO_{2e}/mil)	418,7	349,2	363,6	497,4	471,2	364,5	330,7	210,1	929,1	1132,1
Emissão anual (t CO_{2e})	295,9	581,1	221,3	951,5	909,6	507,4	453,5	107,9	935,6	1545,0

Tabela 30 – Emissões de GEE por milheiro e anuais para propostas do fornecedor 5 (*j*=5)

	Emissões de GEE das propostas do Fornecedor 5									
i \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Emissão por embalagem (kg CO_{2e}/mil)	358,4	308,2	300,9	497,2	491,3	307,3	367,1	437,8	1335,2	1113,1
Emissão anual (t CO_{2e})	253,3	512,9	183,2	951,2	948,4	427,8	503,4	224,9	1115,6	1788,3

Para os prazos de desenvolvimento e de entrega não foi apresentada nenhuma sinergia entre os itens que reduzisse os tempos nas propostas combinadas, portanto estas são colocadas com o maior tempo dentre os itens combinados presentes na mesma, para o atributo Prazo de Desenvolvimento, e como a média dos tempos para o atributo Prazo de Entrega. Aqui os volumes anuais também não interferem nos prazos, pois já foram considerados pelo fornecedor para planejamento dos dias necessários para cada etapa.

Na Tabela 31 são apresentados os prazos de desenvolvimento dados nas propostas de cada fornecedor, e na Tabela 32 são apresentados os prazos de entrega de cada proposta, ambos em dias.

Tabela 31 – Prazo de Desenvolvimento para cada proposta de cada fornecedor

	Prazos de desenvolvimento das propostas (dias)									
j \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Fornecedor 1	218	186	214	185	208	185	219	232	218	208
Fornecedor 2	210	188	220	246	244	200	210	211	220	246
Fornecedor 3	233	239	212	182	190	214	240	184	212	239
Fornecedor 4	192	228	226	234	219	247	207	245	245	234
Fornecedor 5	238	193	221	196	225	193	207	239	239	207

Tabela 32 – Prazo de Entrega (*lead time*) para cada proposta de cada fornecedor

	Lead time das propostas (dias)									
j \ *p*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Fornecedor 1	55	67	63	41	34	81	61	59	59	52
Fornecedor 2	25	53	79	52	69	76	54	68	52	63
Fornecedor 3	57	68	89	42	72	77	29	31	54	63
Fornecedor 4	75	32	76	29	83	45	75	56	54	60
Fornecedor 5	25	57	89	59	57	40	88	86	64	62

No caso descrito, os quatro atributos em análise (Custo Total de Contratação, Emissões de GEE, Prazo de Desenvolvimento e Prazo de Entrega) podem ser considerados como propriedades do sistema, pois cada configuração do conjunto resulta em um desempenho diferente, o que não ocorre quando as propriedades são particulares de cada elemento, e não se alteram conforme as diferentes configurações do conjunto.

4.3.3 Definição das constantes de escala

A aplicação da metodologia MCDA foi feita com auxílio do *software* computacional *V.I.S.A* (*Visual Interactive Sensitivity Analysis for Multi-Criteria Decision Making*), da *Simul8 Corporation*, para implantação. O *software V.I.S.A* não é indispensável (pode-se implantar a metodologia MCDA com auxílio do *MS-Excel*), contudo seu uso facilita a visualização do problema e a modelagem dos pesos e valores.

Na Figura 15, a seguir, é mostrada a árvore de atributos que ilustra as barras de *swing-weights* (à direita), nas quais o Custo foi colocado como atributo mais prioritário de ser melhorado, seguido pelas Emissões de GEE, que equivalem a 75% da melhoria no Custo, e somente então pelo Prazo de Desenvolvimento e Prazo de Entrega, que são respectivamente 60% e 30% em relação à primeira melhoria. Esta

ponderação entre as constantes de escala seguiu o procedimento explicado na seção 3.1.3, e foi realizada com o mesmo grupo decisor multifuncional formado para determinação dos atributos. Ao final do processo, estas prioridades calculadas são normalizadas para que totalizem 100%, e os pesos de cada atributo são vistos ao lado esquerdo da Figura 15.

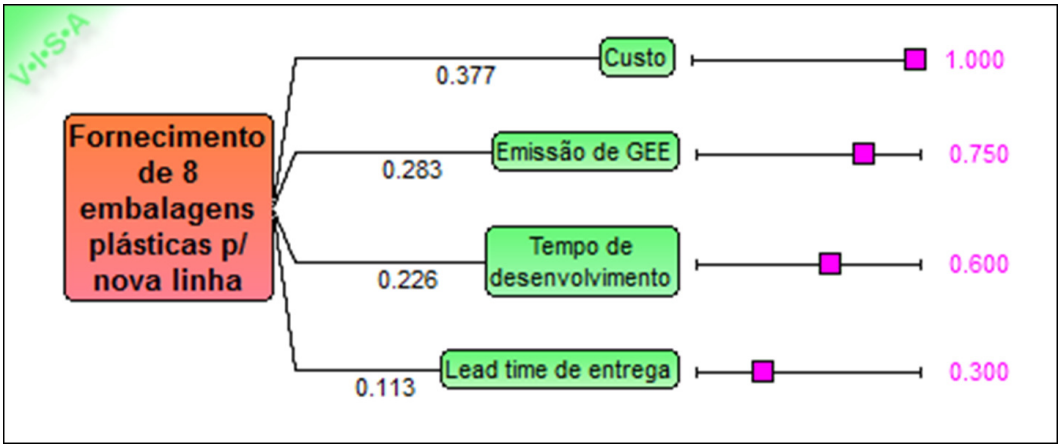
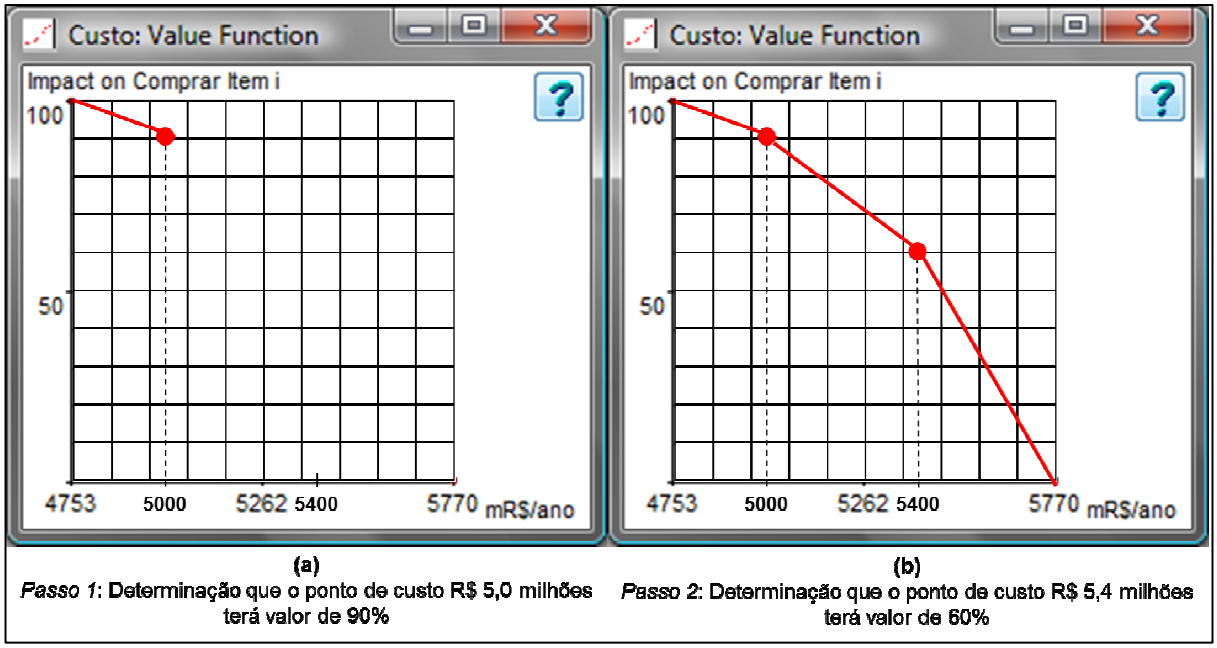


Figura 15 – Atribuição de pesos para priorização dos atributos

4.3.4 Definição das funções de valor

As funções de valor do caso proposto foram determinadas através do método da pontuação direta. O método foi aplicado pela autora conforme a abordagem especialista, embasado pela experiência da mesma por três anos na função de compradora de embalagens plásticas cosméticas, na qual era responsável pela decisão de compra de aproximadamente 150 novas embalagens por ano. No entanto, Montibeller e Franco (2007) explicam como o método é aplicado em um grupo, com o auxílio de um facilitador: primeiramente, deve-se fixar os limites superior e inferior de cada atributo, que podem ser encontrados através de uma otimização monocriterial. Então podem ser verificados a partir da opinião do grupo quais são os valores determinados para cada referência existente para aquele atributo, lembrando que as preferências são construídas e não descobertas, ou seja, não estão prontas para serem extraídas e dependem das condições da situação em questão.

A Figura 16 auxilia no entendimento da lógica de criação de uma função de valor, utilizando como exemplo o atributo Custo. Primeiramente, encontram-se os limites inferior e superior dos custos do conjunto fazendo-se uma otimização monocriterial do modelo, considerando apenas a restrição da exclusividade de fornecimento, tanto para minimização (para calcular o mínimo custo possível do conjunto) quanto para maximização (para calcular o máximo custo possível do conjunto). São então encontrados os valores limites de R$ 4,75 milhões/ano e R$ 5,77 milhões/ano do eixo da abscissa.



(a)
Passo 1: Determinação que o ponto de custo R$ 5,0 milhões terá valor de 90%

(b)
Passo 2: Determinação que o ponto de custo R$ 5,4 milhões terá valor de 60%

Figura 16 – Construção da função de valor para o atributo Custo

É dado pelo orçamento da empresa que o gasto estimado para compra de embalagens para o projeto é de até R$ 5,4 milhões, sendo uma meta desafiadora ter um custo total de R$ 5,0 milhões por ano. Sendo assim, existem duas referências em relação ao Custo Total do projeto, o que justifica o uso do método de pontuação direta pela sua facilidade de aplicação. O primeiro questionamento que deve ser feito é: “sabendo que o menor custo total possível é R$ 4,75 milhões, e isso equivale a 100% do valor para esta função, o quanto valerá o custo total de R$ 5,0 milhões, que é a meta desafio de custo do projeto?” Em consenso, foi decidido que o valor para este ponto do custo é de 90%, sendo equivalente a uma queda pequena de 10% do valor máximo da função, pois quanto menor o custo melhor, porém até R$ 5,0 milhões o resultado financeiro é muito bom para a empresa.

O outro ponto de referência é R$ 5,4 milhões, que ainda está dentro do orçamento, porém é um resultado que não supera a expectativa dos acionistas. Foi feita uma pergunta de forma similar a anterior, para entender a percepção de valor em relação a nova referência de custo, e chegou-se ao valor de 60%.

Após este ponto, a função de valor decresce de maneira mais acentuada com o aumento do custo, o que significa que aumentos de custo a partir de R$ 5,4 milhões são mais penalizados do que aumentos entre R$ 5,0 milhões e R$ 5,4 milhões; e mais ainda em relação aos aumentos até chegar em R$ 5,0 milhões. Esta percepção pode ser comprovada pelo número de divisões mostradas no gráfico: o valor do último trecho da curva cai 6 divisões (no eixo da coordenada) enquanto o custo avança 3,5 divisões (no eixo da abscissa). A curva final da função de valor para o atributo Custo é mostrada na Figura 17.

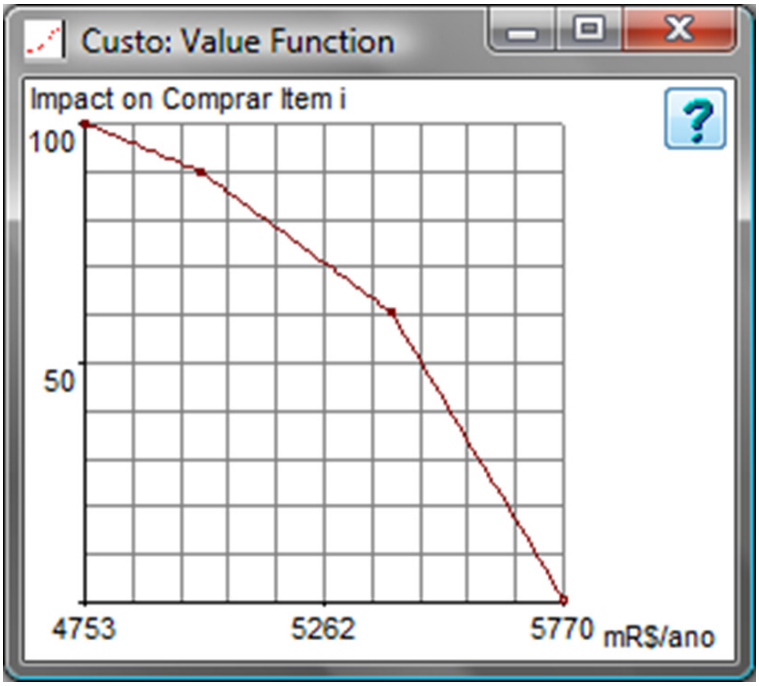


Figura 17 – Função de valor para o atributo Custo Total

O mesmo procedimento de criação é feito para os demais atributos, que são apresentados a seguir. No atributo de Emissões de GEE (Figura 18), foi estabelecida uma função de valor linear simples, pois quanto menor o valor total das Emissões de GEE, maior será o valor gerado. Neste caso, um aumento de 400 toneladas de CO_{2e} na primeira parte da curva equivale a este mesmo aumento na segunda parte da curva.

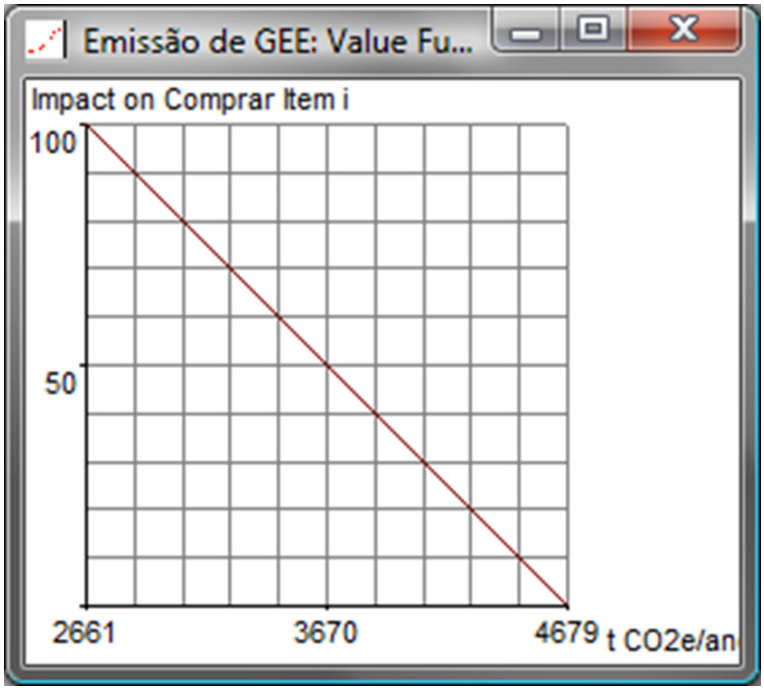


Figura 18 – Função de valor para o atributo Emissões de GEE

Para o atributo de Prazo de Desenvolvimento, na Figura 19, a função tem uma leve redução linear de 10% do valor (100% para 90%) no ponto de 212 dias, pois este é o tempo mínimo para desenvolvimento de todo o projeto.

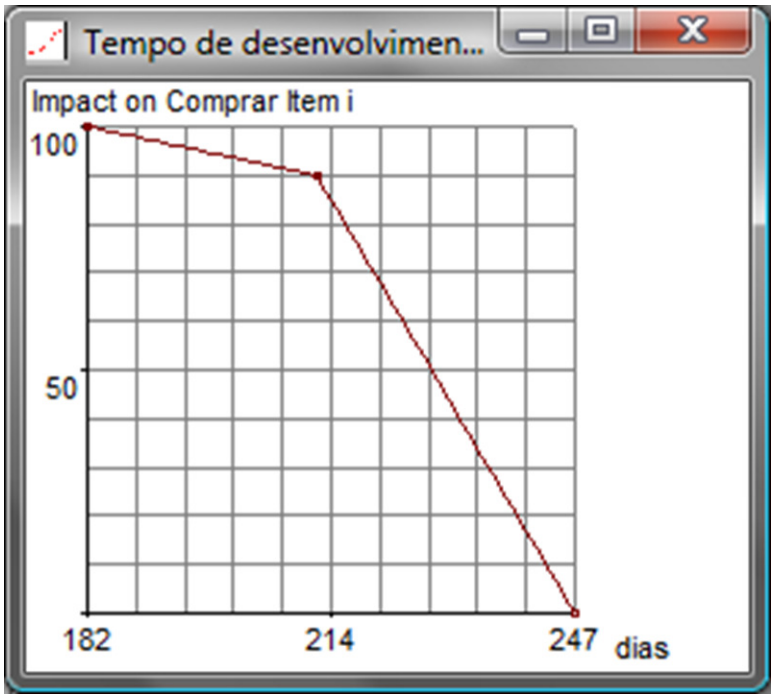


Figura 19 – Função de valor para o atributo Prazo de Desenvolvimento

O tempo de 212 dias foi obtido encontrando-se o valor máximo dos mínimos de cada item, dados na Tabela 10, e corresponde ao valor mínimo para desenvolver o item 3 do conjunto. Ao aumentar-se o Prazo de Desenvolvimento a partir do 212º dia, a função de valor tem uma queda acentuada até atingir o nível zero em 247 dias, que é o prazo máximo dado pelos fornecedores participantes do projeto.

Na Figura 20, para o atributo de Prazo de Entrega, a função tem um ponto importante de quebra em 49 dias, que é o limite do tempo de horizonte fixo de planejamento da empresa, ou seja, qualquer entrega que seja feita em mais do que 49 dias exige manutenção de estoque de segurança do insumo para minimizar os riscos de desabastecimento logístico. Então, a partir deste ponto, a função de valor cai abruptamente até zero. Porém, no início da curva há uma leve queda de 100% a 90% do valor, quando o *lead time* aumenta de 25 (mínimo) a 49 dias, devido ao fato de que um menor tempo de resposta na entrega sempre deve ser beneficiado, pois permite um melhor atendimento no caso de superação de vendas.

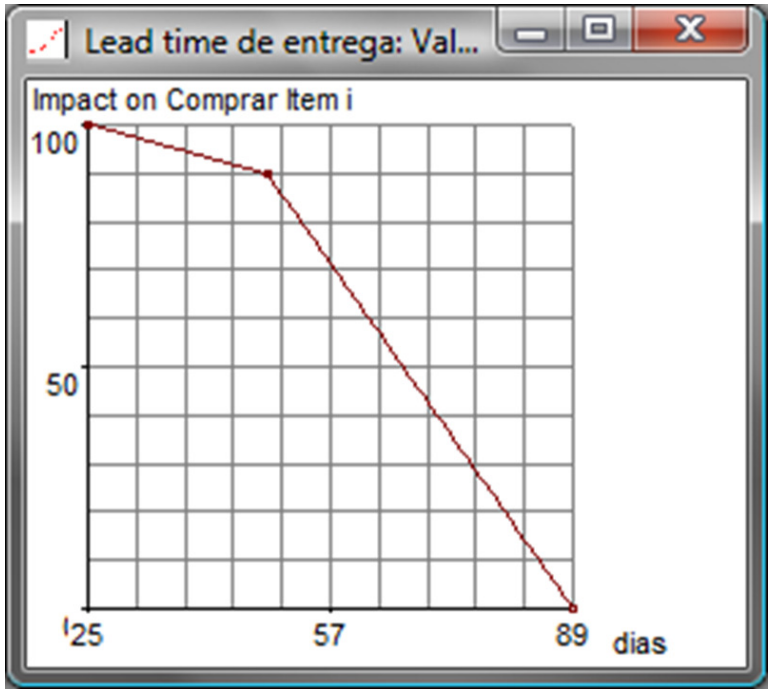


Figura 20 – Função de valor para o atributo Prazo de Entrega (*lead time*)

Apesar das funções de valor apresentadas serem não-lineares (com exceção da função de valor para as Emissões de GEE), elas podem ser modeladas para otimização como funções lineares por trechos com auxílio de variáveis binárias (WINSTON; VENKATARAMANAN, 2003), conforme foi demonstrado no item 3.

4.4 Aplicação da modelagem matemática ao caso

Todas as equações mostradas na seção 3.2 deste trabalho foram aplicadas ao problema da seleção de fornecedores de embalagem na indústria cosmética, nas abordagens da modelagem monocriterial de cada atributo, modelagem multicriterial e modelagem multicriterial combinatória. Os resultados das três aplicações podem ser conferidos e analisados no capítulo 5. Os atributos desejados e de interesse para o problema já foram apresentados e os mesmos foram parametrizados com as constantes de escala e funções de valores desenvolvidas de acordo com a metodologia citada anteriormente.

4.4.1 Otimização monocriterial

Para este caso, pode-se fazer a otimização monocriterial individualmente para os atributos escolhidos: Custo Total, Emissões de GEE, Prazo de Desenvolvimento e Prazo de Entrega. Estas otimizações não serão combinatórias, portanto não serão utilizados os dados das propostas 9 e 10 apresentadas para cada fornecedor nas Tabelas 21 a 32. A análise combinatória será incluída posteriormente no modelo para comparativo com a otimização multicriterial.

As quatro equações a seguir mostram a função objetivo de minimização de cada um dos atributos, individualmente, sendo que todas se submetem às mesmas restrições do modelo colocadas nas Equações 2 a 6, no capítulo 3.

Para a otimização dos Custos, segue a Equação 1, que já foi apresentada como exemplo de otimização monocriterial no Capítulo 3.

$$Min\ C = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} \cdot x_{ij} \qquad (1)$$

Para a otimização das Emissões de GEE, de forma similar aos Custos, pode ser aplicada a Equação 32.

$$Min\ E = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} e_{ij} \cdot x_{ij} \tag{32}$$

Em que:

E: valor total das Emissões de GEE para o projeto;

e_{ij}: valor total de Emissões de GEE do fornecedor *j* para o item *i*.

Para otimizar o Prazo de Desenvolvimento, deve-se encontrar o tempo máximo dentre os menores tempos para cada fornecedor em cada item, conforme Equação 33[5].

$$Min\ T = \max\left[\sum_{j \in J} t_{ij} \cdot x_{ij}\right], \forall\ i \in I \tag{33}$$

Em que:

T: tempo total de desenvolvimento do projeto;

t_{ij}: tempo de desenvolvimento do fornecedor *j* para o item *i*.

O Prazo de Entrega é otimizado de forma similar ao Prazo de Desenvolvimento, porém considerando a média entre os melhores tempos, de acordo com a Equação 34.

$$Min\ LT = \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} lt_{ij} \cdot x_{ij}\right] \Big/ \sum_{i \in I} i \tag{34}$$

Em que:

LT: prazo total de entrega (*lead time*) dos itens do projeto;

lt_{ij}: *lead time* de entrega do fornecedor *j* para o item *i*.

As restrições a que estão submetidas as funções objetivo apresentadas, para os quatro casos, são repetidas abaixo:

[5] É importante ressaltar que esta modelagem só é possível com a utilização dos *softwares Solver* ou *Premium Solver Platform* (*MS-Excel*), que permite a colocação de parâmetros de máximo e mínimo nas funções, o que não é permitido em outros *softwares* de resolução de pesquisa operacional.

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \ \forall \ i \in I \tag{2}$$

$$\sum_{j \in J} y_j \leq N \tag{3}$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq Q \cdot y_j, \forall \ j \in J \tag{4}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \tag{5}$$

$$y_j \in \{0,1\} \tag{6}$$

No capítulo 5, uma das análises de sensibilidade que serão conduzidas é relativa ao número de fornecedores N, através da modificação da equação 3 para a escolha obrigatória de determinado número de fornecedores, trocando-se o sinal “menor ou igual” para “igual”, da seguinte forma:

$$\sum_{j \in J} y_j = N \tag{35}$$

4.4.2 Otimização multicriterial

Neste caso também não é incluída análise combinatória no modelo, portanto as propostas 9 e 10 apresentadas nas Tabelas 20 a 31 ainda não devem ser consideradas.

O modelo de otimização multicritério faz uma soma dos valores de cada atributo, conforme já foi mostrado na Equação 7. Aplicada ao caso, a função objetivo para esta modelagem é:

$$Max \ V = w_c \cdot v_c + w_e \cdot v_e + w_t \cdot v_t + w_{lt} \cdot v_{lt} \tag{36}$$

Em que:

c: índice que representa o atributo *Custo*;

e: índice que representa o atributo *Emissões de GEE*;

t: índice que representa o atributo *Prazo de Desenvolvimento*;

lt: índice que representa o atributo *Prazo de Entrega (lead time)*;

À função objetivo estão submetidas as mesmas restrições gerais já apresentadas na otimização monocriterial, mostradas a seguir.

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \ \forall \ i \in I \tag{2}$$

$$\sum_{j \in J} y_j \leq N \tag{3}$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq Q \cdot y_j, \forall \ j \in J \tag{4}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \tag{5}$$

$$y_j \in \{0,1\} \tag{6}$$

Sendo que novamente a Equação 3 será substituída pela equação 35 para fins de análise de sensibilidade variando-se o número de fornecedores.

$$\sum_{j \in J} y_j = N \tag{35}$$

Também estão submetidas à função objetivo (Equação 36) as restrições específicas de cada atributo, com a linearização de suas funções de valor, conforme aplicado nas próximas equações.

Para o atributo Custo, cuja função de valor possui 4 quebras (n=4):

$$v_c = z_{c1} \cdot f(c_1) + z_{c2} \cdot f(c_2) + z_{c3} \cdot f(c_3) + z_{c4} \cdot f(c_4) \tag{37}$$

$$z_{c1} \leq a_{c1}, \ z_{c2} \leq a_{c1} + a_{c2}, \ z_{c3} \leq a_{c2} + a_{c3}, \ z_{c4} \leq a_{c3} \tag{38}$$

$$a_{c1} + a_{c2} + a_{c3} = 1 \tag{39}$$

$$z_{c1} + z_{c2} + z_{c3} + z_{c4} = 1 \tag{40}$$

$$C = z_{c1} \cdot c_1 + z_{c2} \cdot c_2 + z_{c3} \cdot c_3 + z_{c4} \cdot c_4 = \sum_{i=1}^{8} \sum_{j=1}^{5} c_{ij} \cdot x_{ij} \tag{41}$$

$$z_{cm} \geq 0 \tag{42}$$

$$a_{cm} \in \{0,1\} \tag{43}$$

O atributo Emissões de GEE, cuja função de valor já é linear, foi modelado como se tivesse 3 quebras (n=3):

$$v_e = z_{e1} \cdot f(e_1) + z_{e2} \cdot f(e_2) + z_{e3} \cdot f(e_3) \tag{44}$$

$$z_{e1} \leq a_{e1}, \;\; z_{e2} \leq a_{e1} + a_{e2}, \;\; z_{e3} \leq a_{e2} \tag{45}$$

$$a_{e1} + a_{e2} = 1 \tag{46}$$

$$z_{e1} + z_{e2} + z_{e3} = 1 \tag{47}$$

$$E = z_{e1} \cdot e_1 + z_{e2} \cdot e_2 + z_{e3} \cdot e_3 = \sum_{i=1}^{8} \sum_{j=1}^{5} e_{ij} \cdot x_{ij} \tag{48}$$

$$z_{em} \geq 0 \tag{49}$$

$$a_{em} \in \{0,1\} \tag{50}$$

Para o atributo Prazo de Desenvolvimento, não-acumulativo, cuja função de valor possui 3 quebras (n=3):

$$v_t = \min[z_{t1i} \cdot f(t_{1i}) + z_{t2i} \cdot f(t_{2i}) + z_{t3i} \cdot f(t_{3i})] \;;\; \forall \; i \in I \tag{51}$$

$$z_{t1i} \leq a_{t1i}, \;\; z_{t2i} \leq a_{t1i} + a_{t2i}, \;\; z_{t3i} \leq a_{t2i}; \;\; \forall \; i \in I \tag{52}$$

$$a_{t1i} + a_{t2i} = 1; \;\; \forall \; i \in I \tag{53}$$

$$z_{t1i} + z_{t2i} + z_{t3i} = 1; \;\; \forall \; i \in I \tag{54}$$

$$T_i = z_{t1i} \cdot t_{1i} + z_{t2i} \cdot t_{2i} + z_{t3i} \cdot t_{3i}; \;\; \forall \; i \in I \tag{55}$$

$$T = \max[T_i] = \max\left[\sum_{j=1}^{5} t_{ij} \cdot x_{ij}\right], \forall \; i \in I \tag{56}$$

$$z_{tmi} \geq 0 \tag{57}$$

$$a_{tmi} \in \{0,1\} \tag{58}$$

Em que:

I.: conjunto de itens, no caso em aplicação variando de 1 a 8.

E finalmente para o atributo Prazo de Entrega (*lead time*), também não-acumulativo, cuja função de valor possui 3 quebras (n=3):

$$v_{lt} = \sum_{i=1}^{8} \left[z_{lt1i} \cdot f\left(lt_{1i}\right) + z_{lt2i} \cdot f\left(lt_{2i}\right) + z_{lt3i} \cdot f\left(lt_{3i}\right) \right] \Big/ \sum_{i=1}^{8} i \tag{59}$$

$$z_{lt1i} \leq a_{lt1i}, \;\; z_{lt2i} \leq a_{lt1i} + a_{lt2i}, \;\; z_{lt3i} \leq a_{lt2i}; \;\; \forall \; i \in I \tag{60}$$

$$a_{lt1i} + a_{lt2i} = 1; \;\; \forall \; i \in I \tag{61}$$

$$z_{lt1i} + z_{lt2i} + z_{lt3i} = 1; \;\; \forall \; i \in I \tag{62}$$

$$LT_i = z_{lt1i} \cdot lt_{1i} + z_{lt2i} \cdot lt_{2i} + z_{lt3i} \cdot lt_{3i}; \;\; \forall \; i \in I \tag{63}$$

$$LT = \max\left[LT_i\right] = \max\left[\sum_{j=1}^{5} lt_{ij} \cdot x_{ij}\right], \forall \; i \in I \tag{64}$$

$$z_{ltmi} \geq 0 \tag{65}$$

$$a_{ltmi} \in \{0,1\} \tag{66}$$

Em que:

I: conjunto de itens, no caso em aplicação variando de 1 a 8.

4.4.3 Otimização multicriterial combinatória

Nesta modelagem, baseada na anterior porém com a adição da teoria de leilões combinatórios, temos a inclusão da variável das propostas de cada fornecedor, que é uma combinação dos itens disponíveis. A função objetivo no entanto permanece a mesma apresentada na modelagem anterior:

$$Max \; V = w_c \cdot v_c + w_e \cdot v_e + w_t \cdot v_t + w_{lt} \cdot v_{lt} \tag{36}$$

As restrições gerais foram apresentadas no Capítulo 3 através das Equações 3, 4, 6, 26 e 27, repetidas a seguir.

$$\sum_{j \in J} \sum_{p \in P} a_{ij}^{p} \cdot x_{j}^{p} = 1, \ \forall \ i \in I \tag{26}$$

$$\sum_{j \in J} y_{j} \leq N \tag{3}$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq Q \cdot y_{j}, \forall \ j \in J \tag{4}$$

$$y_{j} \in \{0,1\} \tag{6}$$

$$x_{j}^{p} \in \{0,1\} \tag{27}$$

E, para as análises de sensibilidade, mais uma vez temos a substituição da Equação 3 pela Equação 35:

$$\sum_{j \in J} y_{j} = N \tag{35}$$

As restrições específicas de cada atributo, com a linearização de suas funções de valor, são apresentadas nas próximas equações. Para o atributo Custo houve mudança somente na Equação 41, substituída abaixo pela Equação 67, em relação às equações apresentadas na modelagem de otimização multicriterial sem combinatório.

$$v_{c} = z_{c1} \cdot f(c_{1}) + z_{c2} \cdot f(c_{2}) + z_{c3} \cdot f(c_{3}) + z_{c4} \cdot f(c_{4}) \tag{37}$$

$$z_{c1} \leq a_{c1}, \ \ z_{c2} \leq a_{c1} + a_{c2}, \ \ z_{c3} \leq a_{c2} + a_{c3}, \ \ z_{c4} \leq a_{c3} \tag{38}$$

$$a_{c1} + a_{c2} + a_{c3} = 1 \tag{39}$$

$$z_{c1} + z_{c2} + z_{c3} + z_{c4} = 1 \tag{40}$$

$$z_{cm} \geq 0 \tag{42}$$

$$a_{cm} \in \{0,1\} \tag{43}$$

$$C = z_{c1} \cdot c_{1} + z_{c2} \cdot c_{2} + z_{c3} \cdot c_{3} + z_{c4} \cdot c_{4} = \sum_{j=1}^{5} \sum_{p=1}^{10} k_{j}^{p} \cdot x_{j}^{p} \tag{67}$$

No atributo Emissões de GEE, similar ao atributo Custo, houve substituição da Equação 48 pela Equação 68:

$$v_e = z_{e1} \cdot f(e_1) + z_{e2} \cdot f(e_2) + z_{e3} \cdot f(e_3) \tag{44}$$

$$z_{e1} \leq a_{e1}, \;\; z_{e2} \leq a_{e1} + a_{e2}, \;\; z_{e3} \leq a_{e2} \tag{45}$$

$$a_{e1} + a_{e2} = 1 \tag{46}$$

$$z_{e1} + z_{e2} + z_{e3} = 1 \tag{47}$$

$$z_{em} \geq 0 \tag{49}$$

$$a_{em} \in \{0,1\} \tag{50}$$

$$E = z_{e1} \cdot e_1 + z_{e2} \cdot e_2 + z_{e3} \cdot e_3 = \sum_{j=1}^{5} \sum_{p=1}^{10} e_j^p \cdot x_j^p \tag{68}$$

Para o atributo Prazo de Desenvolvimento, a Equação 56 foi substituída pela Equação 69:

$$v_t = \min[z_{t1i} \cdot f(t_{1i}) + z_{t2i} \cdot f(t_{2i}) + z_{t3i} \cdot f(t_{3i})] \;;\; \forall \; i \in I \tag{51}$$

$$z_{t1i} \leq a_{t1i}, \;\; z_{t2i} \leq a_{t1i} + a_{t2i}, \;\; z_{t3i} \leq a_{t2i}; \;\; \forall \; i \in I \tag{52}$$

$$a_{t1i} + a_{t2i} = 1; \;\; \forall \; i \in I \tag{53}$$

$$z_{t1i} + z_{t2i} + z_{t3i} = 1; \;\; \forall \; i \in I \tag{54}$$

$$T_i = z_{t1i} \cdot t_{1i} + z_{t2i} \cdot t_{2i} + z_{t3i} \cdot t_{3i}; \;\; \forall \; i \in I \tag{55}$$

$$z_{tmi} \geq 0 \tag{57}$$

$$a_{tmi} \in \{0,1\} \tag{58}$$

$$T = \max[T_i] = \max\left[\sum_{j=1}^{5} \sum_{p=1}^{10} t_j^p \cdot x_j^p\right], \forall \; i \in I \tag{69}$$

Em que:

I: conjunto de itens, no caso em aplicação variando de 1 a 8.

E para o atributo Prazo de Entrega (*lead time*), também não-acumulativo, houve substituição da Equação 64 pela Equação 70.

$$v_{lt} = \sum_{i=1}^{8} \left[z_{lt1i} \cdot f\left(lt_{1i}\right) + z_{lt2i} \cdot f\left(lt_{2i}\right) + z_{lt3i} \cdot f\left(lt_{3i}\right) \right] \Big/ \sum_{i=1}^{8} i \tag{59}$$

$$z_{lt1i} \leq a_{lt1i}, \;\; z_{lt2i} \leq a_{lt1i} + a_{lt2i}, \;\; z_{lt3i} \leq a_{lt2i}; \;\; \forall \; i \in I \tag{60}$$

$$a_{lt1i} + a_{lt2i} = 1; \;\; \forall \; i \in I \tag{61}$$

$$z_{lt1i} + z_{lt2i} + z_{lt3i} = 1; \;\; \forall \; i \in I \tag{62}$$

$$LT_i = z_{lt1i} \cdot lt_{1i} + z_{lt2i} \cdot lt_{2i} + z_{lt3i} \cdot lt_{3i}; \;\; \forall \; i \in I \tag{63}$$

$$z_{ltmi} \geq 0 \tag{65}$$

$$a_{ltmi} \in \{0,1\} \tag{66}$$

$$LT = \max\left[LT_i\right] = \max\left[\sum_{j=1}^{5} \sum_{p=1}^{10} lt_j^p \cdot x_j^p \right], \forall \; i \in I \tag{70}$$

Em que:

I: conjunto de itens, no caso em aplicação variando de 1 a 8.

O resultado da aplicação das equações dos três modelos apresentados (monocriterial, multicriterial e multicriterial combinatório) é apresentado no próximo capítulo, onde também são conduzidas as análises de sensibilidade.

5 RESULTADOS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Aqui são apresentados os resultados do problema de seleção de fornecedores de uma indústria cosmética proposto neste trabalho, através dos modelos desenvolvidos nas seções anteriores e seus parâmetros, já expostos e explicados. Os resultados são interpretados de forma detalhada através de comparações entre os modelos aplicados e também com auxílio de análises de sensibilidade, ressaltando conclusões interessantes no caso estudado.

O *software* utilizado para modelagem dos casos formulados neste trabalho é o *Premium Solver Platform*, dentro do ambiente do *MS-Excel*, que utiliza o método Simplex como algoritmo para resolver problemas de programação linear e programação inteira. Esta ferramenta foi escolhida por permitir o armazenamento de dados e a construção de modelos, através de uma interface amigável e de amplo conhecimento, já que o *MS-Excel* é o pacote de planilhas mais utilizado entre gerentes e engenheiros no ambiente empresarial (SEREF; AHUJA; WINSTON, 2007). Todos os cenários modelados obtiveram resultados em poucos segundos, o que viabiliza o uso desta ferramenta como um sistema de suporte à decisão em um ambiente de análise de decisão facilitada em tempo real (FRANCO; MONTIBELLER, 2010).

5.1 Resultados

Aqui são apresentados os resultados da aplicação de caso para as três modelagens propostas: monocriterial, multicriterial e multicriterial combinatória, cujas equações já foram apresentadas em sua forma teórica no capítulo 3, e aplicadas ao caso no capítulo 4, considerando todos os parâmetros específicos do problema.

5.1.1 Otimização monocriterial

As otimizações feitas individualmente para cada atributo, conforme aplicação das equações mostradas na seção 3.2.1, resultam nas designações de fornecimento mostradas a seguir. Para encontrar o resultado ótimo de cada modelo o número de fornecedores não foi restringido (a restrição foi utilizada como menor ou igual a 5, número máximo do problema), porém posteriormente na análise de sensibilidade foi realizada uma otimização para cada número de fornecedores, para avaliação dos comportamentos dos modelos a partir desta variável.

Na otimização por Custo Total de Contratação, o menor custo encontrado para o conjunto é de R$ 4.753 mil, com a escolha de 4 fornecedores conforme a Figura 21.

	F1	F2	F3	F4	F5
I1	0	0	0	1	0
I2	0	0	0	1	0
I3	0	0	0	1	0
I4	0	0	0	1	0
I5	0	1	0	0	0
I6	0	0	0	0	1
I7	1	0	0	0	0
I8	0	1	0	0	0

Figura 21 – Alocação de itens por fornecedor na otimização monocritério por Custo Total

Quando otimizadas as Emissões de GEE, encontra-se o valor mínimo 2.661 t CO_{2e} para o conjunto fornecido conforme a Figura 22, para 5 fornecedores.

	F1	F2	F3	F4	F5
I1	0	1	0	0	0
I2	0	0	0	0	1
I3	0	0	1	0	0
I4	1	0	0	0	0
I5	0	1	0	0	0
I6	1	0	0	0	0
I7	0	1	0	0	0
I8	0	0	0	1	0

Figura 22 – Alocação de itens por fornecedor na otimização monocritério por Emissões de GEE

O melhor Prazo de Desenvolvimento para o conjunto é de 212 dias, com os 3 fornecedores identificados na Figura 23, que é o tempo máximo encontrado no conjunto de itens com menor tempo de desenvolvimento dentre as opções de formação de conjuntos.

	F1	F2	F3	F4	F5
I1	0	0	0	1	0
I2	1	0	0	0	0
I3	0	0	1	0	0
I4	0	0	1	0	0
I5	0	0	1	0	0
I6	1	0	0	0	0
I7	0	0	0	1	0
I8	0	0	1	0	0

Figura 23 – Alocação de itens por fornecedor na otimização monocritério por Prazo de Desenvolvimento

A otimização do Prazo de Entrega é calculada com base no *lead time* médio para o conjunto, que é de 35 dias para a alocação ótima mostrada na Figura 24, com 4 fornecedores. Nesta designação o item com menor lead time é de 25 dias e o maior, 63 dias.

	F1	F2	F3	F4	F5
I1	0	0	0	0	1
I2	0	0	0	1	0
I3	1	0	0	0	0
I4	0	0	0	1	0
I5	1	0	0	0	0
I6	0	0	0	0	1
I7	0	0	1	0	0
I8	0	0	1	0	0

Figura 24 – Alocação de itens por fornecedor na otimização monocritério por Prazo de Entrega

5.1.2 Otimização multicriterial

A modelagem do problema conforme o apresentado no capítulo anterior, seção 4.4.2 da forma multicriterial, traz como resultado a designação de fornecedores mostrada na Figura 25. O número de fornecedores não foi restringido, e a solução ótima contempla a contratação dos 5 fornecedores participantes.

	F1	F2	F3	F4	F5
I1	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**
I2	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**
I3	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**
I4	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**
I5	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**
I6	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**
I7	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**
I8	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**

Figura 25 – Resultado otimizado da designação de fornecedores aos itens, na otimização multicriterial

A comparação numérica destes resultados com os obtidos em cada otimização monocriterial (para cada um dos objetivos individualmente) é mostrada na Tabela 33. Para encontrar os resultados dos demais atributos em cada caso monocriterial utilizou-se a escolha ótima de fornecedores para o atributo minimizado e analisou-se o valor resultante de cada um dos outros atributos (não otimizados) nesta configuração.

Tabela 33 – Comparativo de resultados monocritério vs. multicritério, sem combinatório

ATRIBUTOS	*Cte. Escala*	*MODELAGENS DE OTIMIZAÇÃO*					Vantagem mono-critério
		Multicritérios	Monocritério Custo total	Monocritério Emissões GEE	Monocritério Prazo	Monocritério Lead time	
Custo total (mil R$/ano)	0,377	**5.079,5**	**4.753,3**	5.317,8	5.076,2	4.956,3	6,9%
Emissões GEE (t CO2e/ano)	0,283	**2.993,7**	3.801,9	**2.661,2**	3.564,2	3.985,0	12,5%
Prazo desenvolvimento (dias)	0,226	**212**	244	245	**212**	240	0%
Lead time médio (dias)	0,113	**54**	56	59	67	**35**	53,4%

A última coluna da tabela indica a vantagem da otimização monocritério para o atributo em questão em relação à solução multicritério, ou seja, é a piora no desempenho do atributo dentro da otimização multicritério em comparação à otimização monocritério ótima para somente aquele atributo. Por exemplo, o Custo Total do projeto tem um acréscimo de 6,9% em relação ao custo mínimo otimizado de forma isolada. O pior índice percentual de comparação é o Prazo de Entrega, que no modelo multicritério se distancia em 53,4% da solução ótima monocriterial para este atributo. Isso pode ser explicado pelo fato do Prazo de Entrega ter sido o fator menos priorizado pela empresa na ponderação entre os atributos, e entende-se que uma redução neste atributo em contrapartida a uma piora nos demais não seria vantajosa.

Apesar da análise numérica vista na Tabela 33 mostrar que a solução multicritério tem um resultado individual pior para cada atributo do que nas soluções monocriteriais, analisando-se o conjunto através da priorização feita pelas

constantes de escala na condição multicriterial pode-se concluir que esta tem um resultado superior em valor do que em todas as soluções monocriteriais.

O gráfico da Figura 26, a seguir, ilustra a dominância da decisão multicritério frente às otimizações monocriteriais, considerando as constantes de escala definidas inicialmente para o problema.

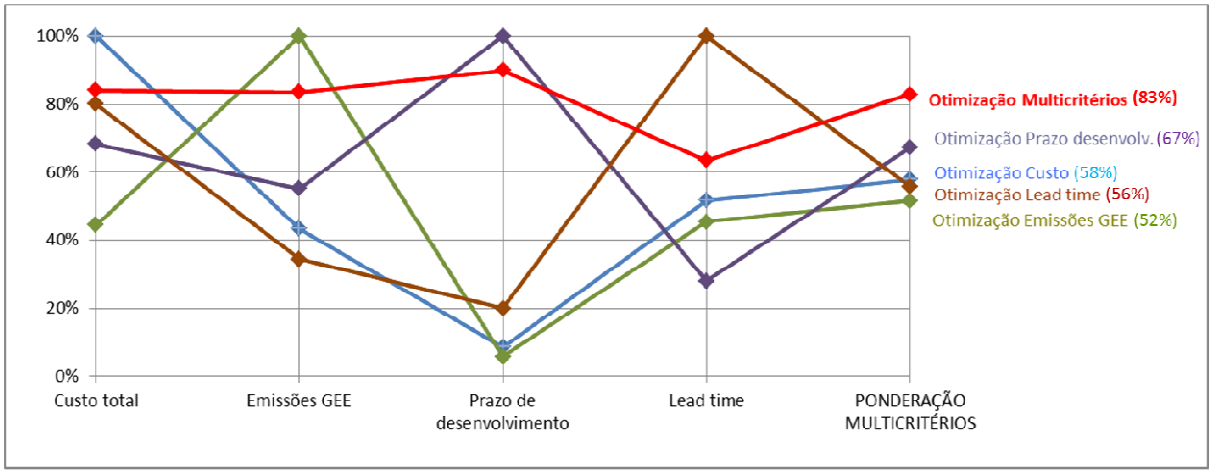


Figura 26 – Gráfico do valor da decisão para cada modelo analisado, sob a luz de cada um dos atributos e na abordagem multicritério

Observando o comparativo gráfico, percebe-se que a solução da otimização multicriterial (em vermelho) é a mais equilibrada entre todos os fatores, conseguindo beneficiar a maioria dos pontos, como se pode perceber na última coluna (à direita), intitulada “Ponderação Multicritérios”. A solução multicritérios alcança o valor de 83%, enquanto as demais ficam entre 52% e 67%. Isso significa que, ao se analisar cada otimização separadamente, a penalização nos demais atributos que não o minimizado na solução monocriterial é relevante e deve-se ter a atenção de não desconsiderá-los, o que não acontece na otimização multicriterial. É importante perceber também que a solução só é sensata e correta para determinado caso se os atributos e parâmetros forem construídos de maneira lógica e expressem a realidade da organização, o que muitas vezes não é trivial.

É interessante observar que o valor da solução multicritério para cada um dos atributos é sempre a segunda melhor opção, após o valor máximo que é obtido pela otimização monocriterial daquele atributo. Isso significa que para nenhum atributo há solução melhor do que a multicritério, excluindo-se a sua solução ótima. E a solução multicritério se mantém acima de 80% em todos os atributos menos o *lead time*, mostrando novamente equilíbrio entre os parâmetros escolhidos.

Pelo gráfico também podemos concluir que alguns atributos tem resultado muito ruim nas demais otimizações monocriteriais, como o Prazo de Desenvolvimento, e na solução multicriterial tem um resultado satisfatório mesmo não sendo o ótimo. Este fato reforça que as decisões individualmente ótimas são raramente coletivamente ótimas, dando origem ao uso ineficiente do recurso total disponível, como ilustrado no "Dilema dos Comuns" (*Commons Dilemma*), descrito por Hardin em 1968 (PHILLIPS; BANA E COSTA, 2007). O dilema diz que, em uma situação com diversos indivíduos agindo de forma independente e racionalmente de acordo com seus interesses próprios, todos os recursos disponíveis compartilhados irão por fim se esgotar, mesmo sendo claro que ninguém tem interesse de longo prazo para que isso ocorra, sendo o oposto do desenvolvimento sustentável.

5.1.3 Otimização multicriterial combinatória

A otimização multicriterial combinatória difere da não combinatória somente pelos pacotes adicionais oferecidos pelos fornecedores, que trazem uma vantagem de desconto em Custo e também desconto em Emissões de GEE devido à sinergia de fabricação e frete de entrega para o cliente. Os atributos, funções de valor de cada atributo e as constantes de escala foram mantidos os mesmos do problema multicriterial sem combinatório, bem como todos os parâmetros utilizados para resolução. O resultado trouxe a alocação de itens por fornecedores conforme mostrado na Figura 27.

	F1	F2	F3	F4	F5
I1	0	1	0	0	0
I2	0	0	0	0	1
I3	0	0	1	0	0
I4	1	0	0	0	0
I5	1	0	0	0	0
I6	1	0	0	0	0
I7	0	0	0	1	0
I8	0	0	1	0	0

Figura 27 – Resultado otimizado da designação de fornecedores aos itens, na otimização multicriterial combinatória

A solução difere da mostrada na Figura 25, multicritério sem combinatório, somente para a escolha de fornecimento do item i = 4, que anteriormente foi alocado para o fornecedor j = 3 e considerando a análise combinatória foi agora alocado para o fornecedor j = 1, que ofereceu um pacote de fornecimento com benefícios para a compra conjunta dos itens 4, 5 e 6 que otimizou a solução do problema, mudando o resultado obtido anteriormente. A Figura 29 mostra a designação dos itens para cada proposta feita pelos 5 fornecedores, que foram todos escolhidos para prover algum item.

A escolha do pacote de número 10 oferecido pelo fornecedor 1, que trouxe a diferenciação da solução combinatória, trará como benefícios um ganho financeiro anual de R$ 120,0 mil em relação a seleção realizada na otimização multicriterial, e uma economia anual de 113,3 t CO_{2e}. O valor total da função objetivo encontrado nesta modelagem foi de 88%, superior ao valor da otimização multicritério sem combinatório, que foi de 83%.

Na Figura 28, abaixo, tem-se a inclusão dos resultados da solução multicriterial combinatória no gráfico já conhecido da Figura 26. A solução combinatória é superior em valor a todas as soluções monocriteriais, como esperado, e em relação à solução multicriterial supera em todos os atributos com exceção do Prazo de Desenvolvimento, no qual ambas têm o mesmo resultado.

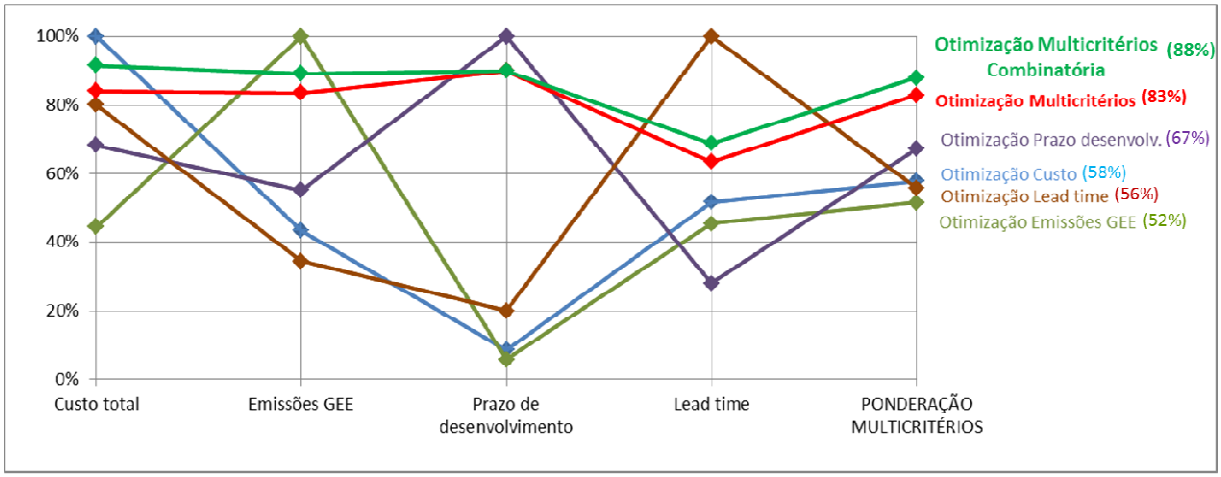


Figura 28 – Gráfico do valor da decisão para cada modelo analisado, sob a luz de cada um dos atributos e em ambas abordagens multicritério

Designação para propostas do Fornecedor 1:

	F1P1	F1P2	F1P3	F1P4	F1P5	F1P6	F1P7	F1P8	F1P9	F1P10
I1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**1**
I5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**1**
I6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**1**
I7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Designação para propostas do Fornecedor 2:

	F2P1	F2P2	F2P3	F2P4	F2P5	F2P6	F2P7	F2P8	F2P9	F2P10
I1	**1**	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Designação para propostas do Fornecedor 3:

	F3P1	F3P2	F3P3	F3P4	F3P5	F3P6	F3P7	F3P8	F3P9	F3P10
I1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I3	0	0	**1**	0	0	0	0	0	0	0
I4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I8	0	0	0	0	0	0	0	**1**	0	0

Designação para propostas do Fornecedor 4:

	F4P1	F4P2	F4P3	F4P4	F4P5	F4P6	F4P7	F4P8	F4P9	F4P10
I1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I7	0	0	0	0	0	0	**1**	0	0	0
I8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Designação para propostas do Fornecedor 5:

	F5P1	F5P2	F5P3	F5P4	F5P5	F5P6	F5P7	F5P8	F5P9	F5P10
I1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I2	0	**1**	0	0	0	0	0	0	0	0
I3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 29 – Designação de itens por proposta na solução multicritério combinatória

5.2 Análise de sensibilidade

O modelo utilizado permite simular os resultados com outras configurações, através de análises de sensibilidade, para validar as atribuições de valor feitas no desenvolvimento do modelo. Para o caso em estudo foram feitos dois tipos de análise: a variação dos resultados dependendo do número de fornecedores imposto ao modelo e da ponderação das constantes de escala entre os atributos.

5.2.1 Por número de fornecedores

Primeiramente, avaliou-se o resultado de cada otimização monocriterial pelo número de fornecedores, através da Equação 35[6], variando-se o valor de N (número de fornecedores) de 1 até 5.

Para a otimização do Custo, a análise encontra-se na Figura 30. O menor valor é encontrado escolhendo-se 4 fornecedores, sendo que a escolha de 5 fornecedores tem pouco impacto no custo, enquanto a determinação de 3 fornecedores ou menos traz um aumento de valor significativo, de até R$ 172,8 mil no ano.

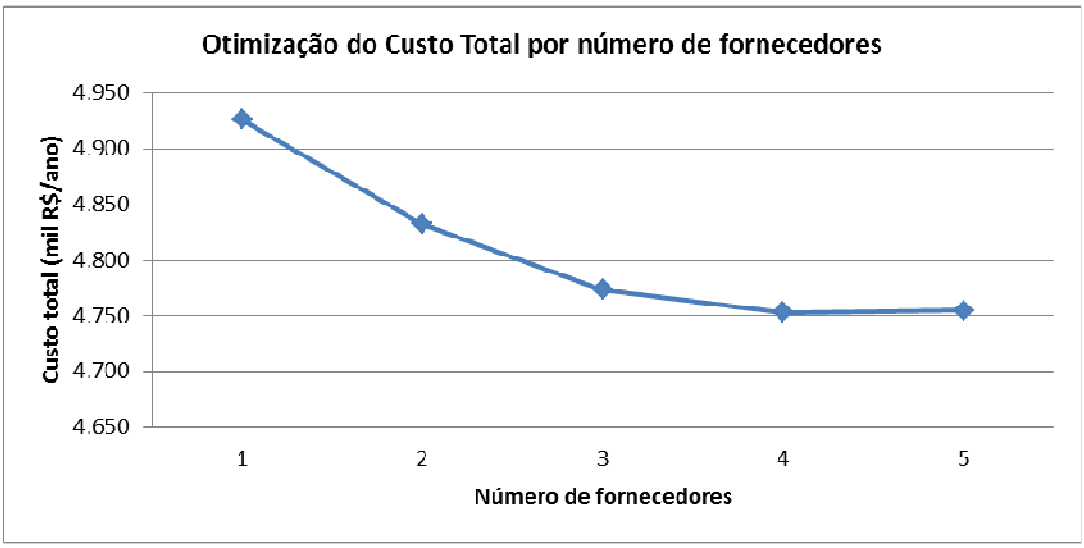


Figura 30 – Otimização monocriterial do Custo Total por número de fornecedores

[6] A Equação 35 para aplicação nas otimizações monocriteriais encontra-se na página 86.

A Figura 31 apresenta a otimização das Emissões de GEE. Apesar de a solução ótima utilizar os 5 fornecedores permitidos, o gráfico mostra que a partir de 3 fornecedores o valor das emissões não se altera com grande amplitude.

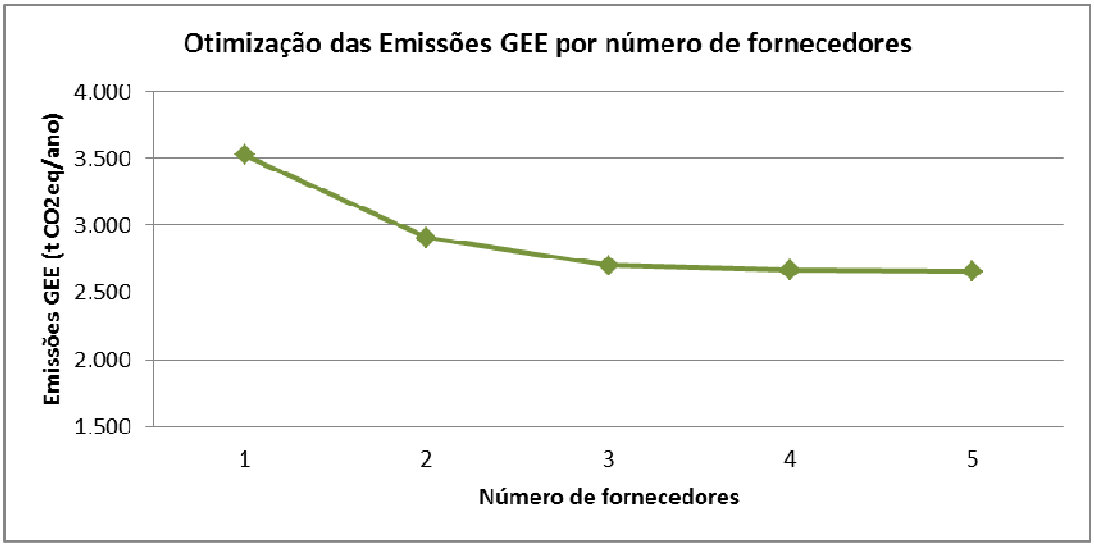


Figura 31 – Otimização monocriterial das Emissões de GEE por número de fornecedores

Analisando-se as variações do Prazo de Desenvolvimento (Figura 32) é possível concluir que somente a escolha de 1 ou 2 fornecedores impacta na solução, já que a partir de 3 fornecedores o prazo se estabiliza na condição ótima, de 212 dias.

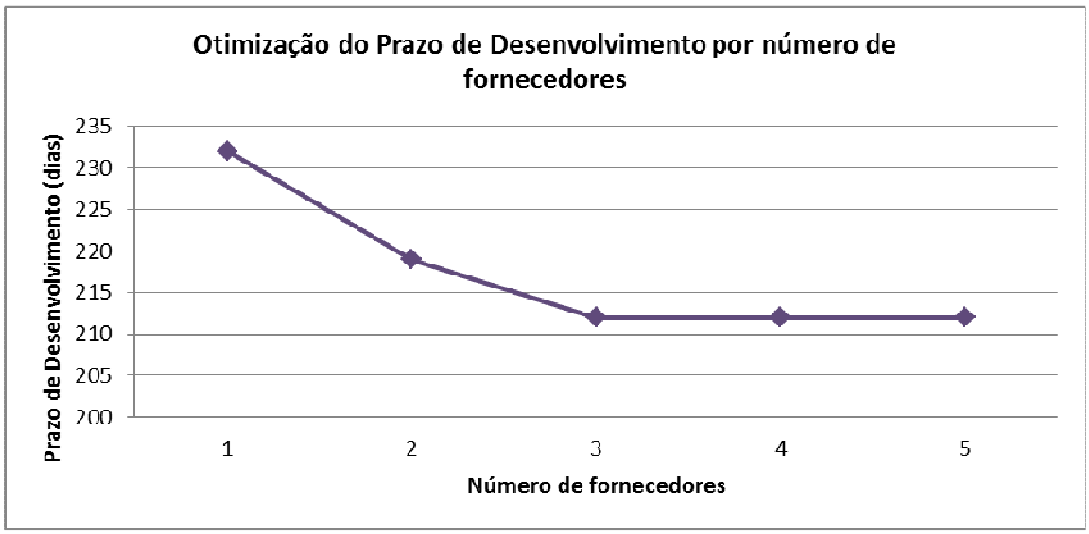


Figura 32 – Otimização monocriterial do Prazo de Desenvolvimento por número de fornecedores

Finalmente para o Prazo de Entrega, onde o número ótimo de fornecedores é 4, encontra-se a curva onde há mais variação relativa entre a melhor e a pior opção, na Figura 33. Ao se eleger somente 1 fornecedor o Prazo de Entrega é 63% maior, ou 22 dias mais longo, do que utilizando 4 ou 5 fornecedores.

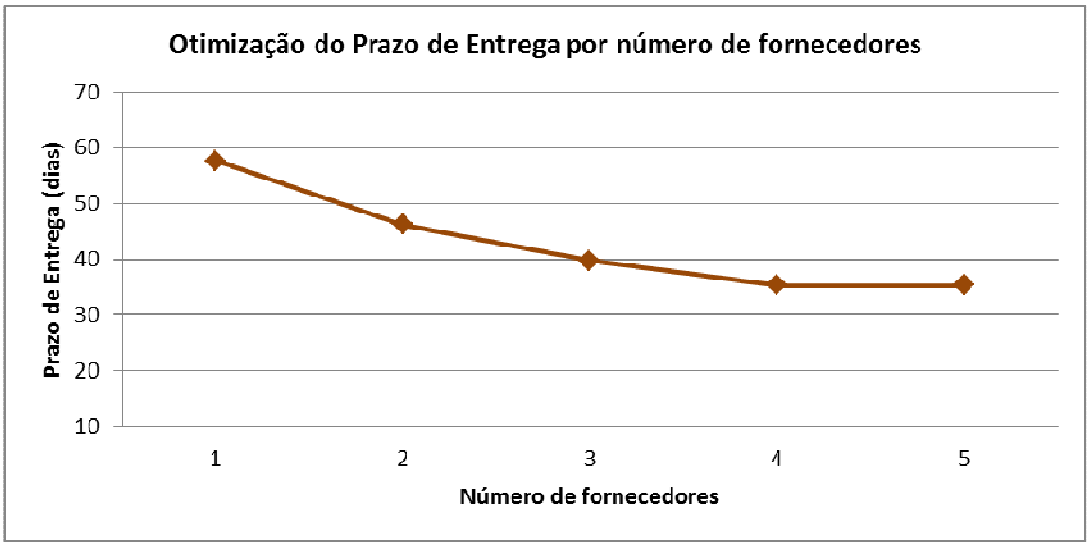


Figura 33 – Otimização monocriterial do Prazo de Entrega por número de fornecedores

A mesma avaliação por número de fornecedores foi feita também com as duas otimizações multicriteriais analisadas. Mantendo todas as variáveis utilizadas até o momento para a resolução do problema e utilizando o número de fornecedores como uma restrição, variando de 1 a 5 como feito anteriormente, obteve-se o cenário da Figura 34 que compara as duas soluções multicritério estudadas.

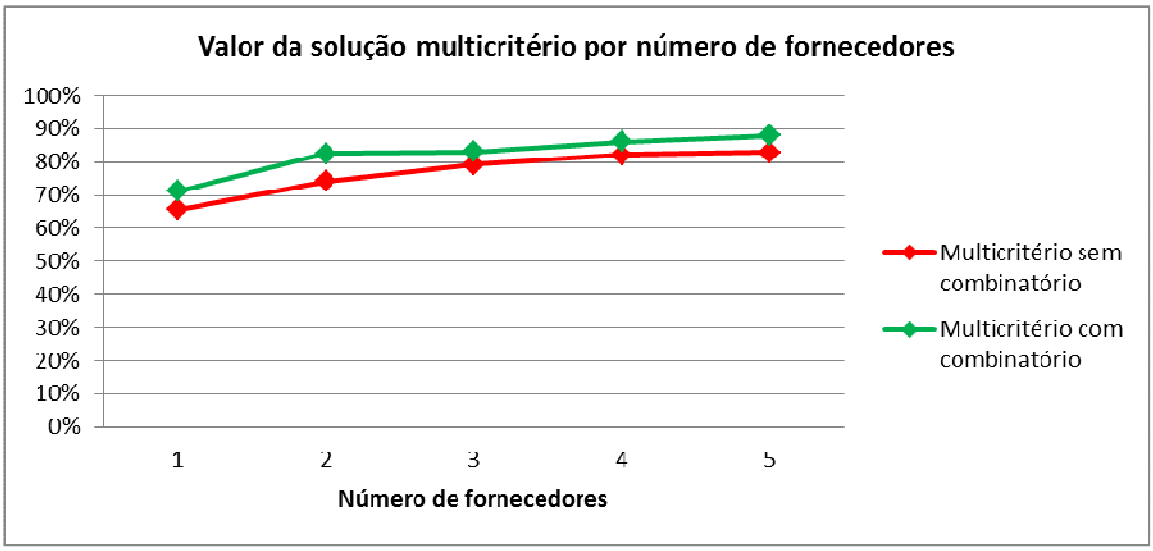


Figura 34 – Comparativo das soluções multicritério variando-se o número de fornecedores

Já era conhecido da solução ótima de ambas as abordagens do problema que o maior valor para a função é encontrado quando o número de fornecedores é 5, máximo número de participantes permitido no caso. No entanto, observando-se o gráfico da Figura 34 é visível que a seleção de 5 fornecedores não é tão vantajosa sobre a escolha de 4 fornecedores, em ambos os casos. Esta é uma consideração importante, pois a utilização de uma base menor de fornecedores significa ter menor complexidade de gestão e consequentemente menor custo total, o que deve ser dosado com o risco de desabastecimento decorrente de depender de menos parceiros.

Quando se calcula o resultado de forma a restringir o número de fornecedores ganhadores, percebe-se que a solução multicritério com combinatório continua dominante sobre a solução multicritério sem combinatório em todos os pontos, o que era esperado pois a otimização combinatória oferece benefícios em custo e emissões de carbono em relação a não combinatória, enquanto todos os demais parâmetros são iguais. A partir desta informação, também é possível deduzir pela curva do gráfico que ao menos um pacote combinatório foi escolhido em todos os pontos para a solução combinatória, caso contrário deveria existir um mesmo ponto de solução para ambos os casos multicritério, o que não ocorre.

5.2.2 Por ponderação das constantes de escala

A análise de sensibilidade por ponderação das constantes de escala avalia os modelos criados a partir de mudanças nos pesos estabelecidos para cada atributo, ou seja, modifica as importâncias relativas entre eles e as consequentes mudanças nos resultados a partir destas alterações.

Na primeira análise, utilizou-se o modelo de decisão multicritério combinatório alterando-se as constantes de escala de forma a dar foco em somente um atributo, com priorização de 100%, enquanto os demais receberam participação de 10% cada um, estabelecendo um peso normalizado de 76,9% para o atributo principal e 7,7% para os três restantes. Esta dinâmica foi realizada para os quatro atributos, e os resultados também foram avaliados em relação ao número de fornecedores. O comportamento é mostrado no gráfico da Figura 35, a seguir.

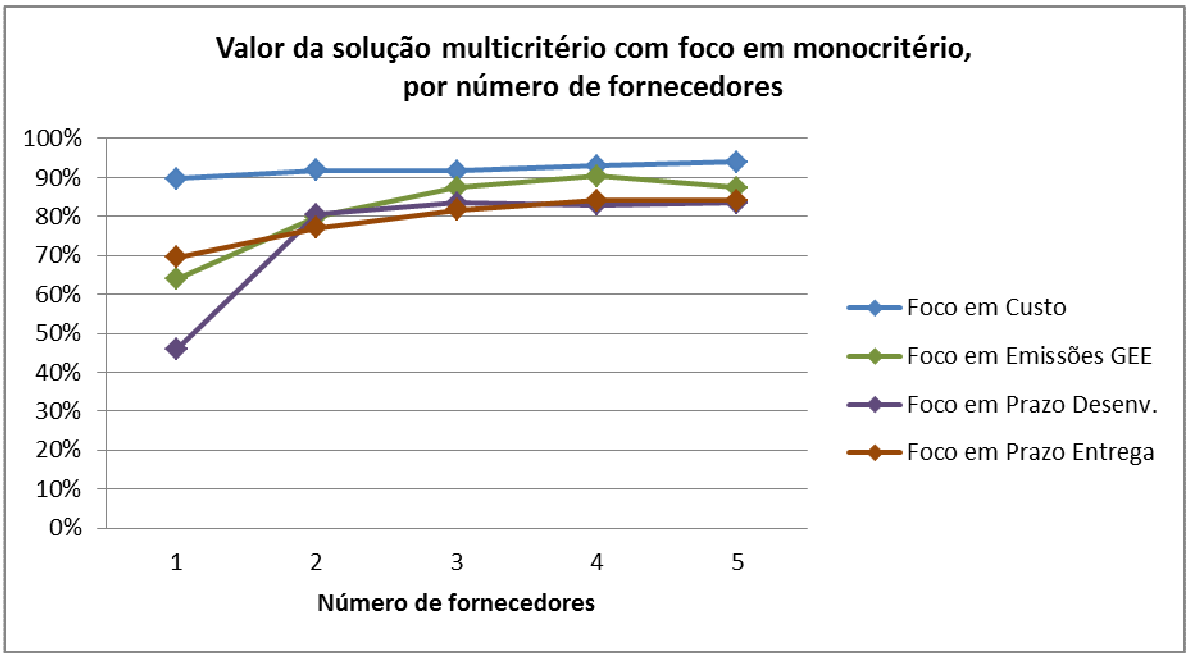


Figura 35 – Comportamento da solução multicritério com foco em determinado atributo, por número de fornecedores

Todas as soluções melhoram, ou seja, atingem um valor maior conforme o número de fornecedores aumenta, com exceção da curva de solução com foco nas Emissões de GEE, onde o número ideal de fornecedores é 4 e forçando-se a escolha de 5 fornecedores o valor total da função é reduzido, de 90,4% para 87,3%. Pode-se também observar variações nas inclinações de cada curva, o que indica que o benefício pelo número de fornecedores muda conforme o atributo que se elege como prioritário na decisão. Por exemplo, a escolha de apenas 1 fornecedor em uma situação em que o Prazo de Desenvolvimento é foco penaliza muito a função de valor, pois elegendo-se 2 fornecedores o ganho é de quase 35 pontos percentuais, ou 75% em relação ao uso de somente 1 fornecedor. Já quando o foco é em Custo, a diferença de valor entre a utilização de diferentes números de fornecedores é pouco significativa, variando em quatro pontos percentuais da pior para a melhor opção.

Ainda sobre a análise da figura 35, é interessante observar a escolha ou não dos pacotes combinatórios disponibilizados pelos fornecedores. Nos casos com foco em Custo e Emissões de GEE, que são os atributos beneficiados pelos pacotes, houve escolha de itens fornecidos em pacotes para todos os números de fornecedores restringidos, sendo que em ambos os casos foram escolhidos 2 pacotes (totalizando 5 itens) na análise de apenas 1 fornecedor permitido, e 1 pacote nas demais opções. No caso com foco em Prazo de Entrega houve escolha de 1 pacote apenas para a

seleção de 1, 2 e 3 fornecedores, a simulação com 4 ou 5 fornecedores não escolheu nenhum pacote por encontrar soluções individuais que trouxeram valor melhor para o total da função com foco em Prazo de Entrega; e no caso que prioriza o Prazo de Desenvolvimento não foi escolhido nenhum pacote em nenhuma das opções avaliadas.

Por fim, uma análise de sensibilidade adicional válida no ambiente empresarial propõe uma nova modificação na ponderação das constantes de escala entre os atributos, de forma a verificar a validade da solução encontrada inicialmente perante um cenário hipotético com outra priorização entre os mesmos atributos, que se difere da análise mostrada primeiramente nesta subseção por haver um equilíbrio maior na ponderação entre os atributos, como no caso original.

Para tanto, os atributos foram modificados para uma priorização baseada nas Emissões de GEE, depois no Prazo de Entrega e somente então no Custo Total e no Prazo de Desenvolvimento. O direcionamento da decisão é agora diferente do tomado anteriormente, porém deve continuar sendo coerente aos conceitos da empresa e pode ser mais ou menos adequado ao contexto, dependendo do que o produto em questão deve priorizar (no caso, como a embalagem que está sendo comprada pode contribuir para os objetivos fundamentais da empresa).

Esta nova priorização é indicada na Figura 36, que mostra a utilização das barras de *swing-weights* no *MS-Excel*, através de uma funcionalidade do programa que é muito prática no auxílio à execução das análises de sensibilidade. No caso, a nova alocação das constantes de escala foi determinada pela autora com fins acadêmicos, mas pode ser utilizado o mesmo grupo multifuncional formado pelas áreas envolvidas na decisão para novamente discutir sobre as prioridades do projeto, retomando a discussão que foi feita na primeira determinação das constantes de escala, no item 4.3.3.

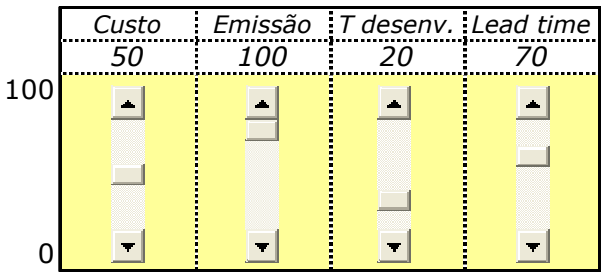


Figura 36 – Nova priorização de constantes de escala para análise de sensibilidade

Os novos pesos normalizados encontrados para Custo, Emissões de GEE, Prazo de Desenvolvimento e Prazo de Entrega são, respectivamente, 20,8%, 41,7%, 8,3% e 29,2%. O resultado da alocação sem considerar análise combinatória é mostrado na Figura 37.

	F1	F2	F3	F4	F5
I1	0	1	0	0	0
I2	0	0	0	0	1
I3	0	0	1	0	0
I4	0	0	1	0	0
I5	1	0	0	0	0
I6	0	0	0	0	1
I7	0	1	0	0	0
I8	0	0	1	0	0

Figura 37 – Resultado otimizado da designação de fornecedores aos itens, com a nova ponderação das constantes de escala, no caso multicritério

Comparando os novos resultados com os originalmente obtidos na otimização multicriterial, houve um aumento de R$ 185,3 mil no Custo Total de Contratação (3,6%) e também um aumento de 38,5 t CO_{2e} (1,3%) nas Emissões de GEE, mesmo sendo o atributo com maior peso na priorização; sem alteração no Prazo de Desenvolvimento. A vantagem é obtida no Prazo de Entrega, que foi reduzida em 8 dias (14,3%). O número total de fornecedores escolhidos para a solução ótima passou de 5 para 4, o que reduz a complexidade de gestão de materiais.

A análise que deve ser feita pelos decisores é se este *trade-off* compensa, ou seja, se a redução obtida no Prazo de Entrega vale o aumento de Custo e das Emissões de GEE do projeto. Não há uma resposta pronta para esta questão, pois dependerá do perfil, das características e das necessidades da empresa no momento, e isso deve ser discutido pelo grupo para se atingir um consenso.

Aplicando a mesma priorização das constantes de escala da Figura 36 no modelo multicritério combinatório, o resultado encontrado é o da Figura 38, onde a designação se altera (em relação às alocações da Figura 37) devido à escolha do pacote de fornecimento 10 do fornecedor 1. O fornecedor 4 continua não sendo escolhido.

	F1	F2	F3	F4	F5
I1	0	1	0	0	0
I2	0	0	0	0	1
I3	0	0	1	0	0
I4	1	0	0	0	0
I5	1	0	0	0	0
I6	1	0	0	0	0
I7	0	1	0	0	0
I8	0	0	1	0	0

Figura 38 – Resultado otimizado da designação de fornecedores aos itens, com a nova ponderação das constantes de escala, no caso multicritério combinatório

Ainda analisando-se os resultados desta nova configuração, através das otimizações multicritério, um comparativo similar ao apresentado na Figura 35 é repetido na Figura 39, mostrando o resultado restringindo o número de fornecedores utilizando ou não a otimização combinatória.

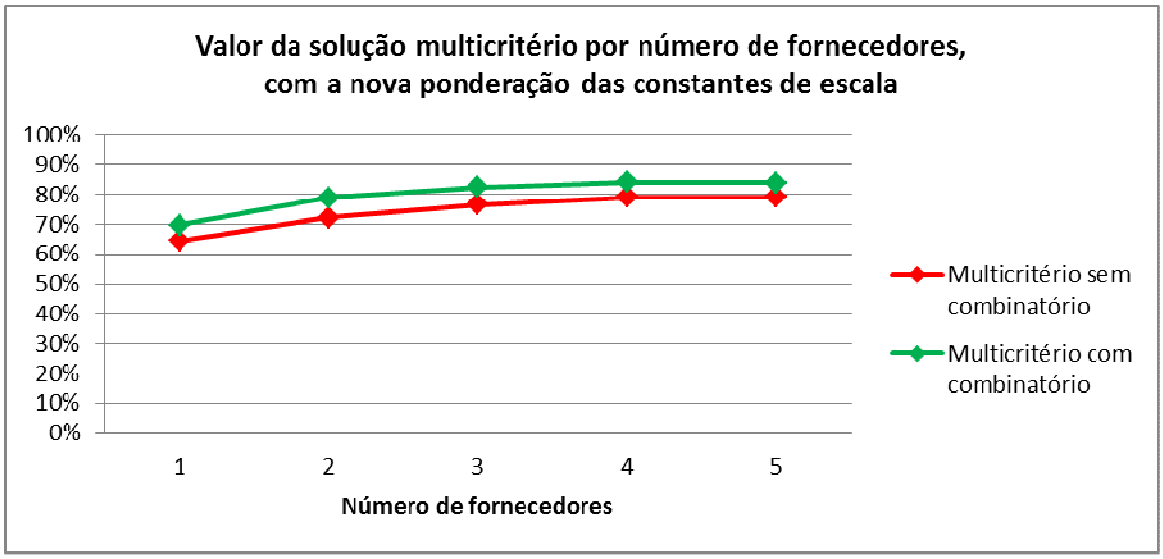


Figura 39 – Comparativo das soluções multicritério variando-se o número de fornecedores, com a nova ponderação das constantes de escala

O gráfico da Figura 39 reforça a superioridade da solução multicriterial combinatória em relação à não combinatória, novamente em todos os pontos da curva como na Figura 35. Os valores atingidos para a função objetivo, neste novo cenário, foram inferiores aos da configuração original das constantes de escala, o que significa que a solução original atende de forma mais completa à priorização dos atributos feita na ocasião, porém não indica que a solução é melhor ou pior do que esta última obtida, pois como já foi mencionado, isso dependerá se os atributos foram estabelecidos de forma a retratar fidedignamente as preferências da empresa em questão.

5.3 Impacto das análises na tomada de decisão

O principal objetivo de fazer análises de sensibilidade é certificar que a solução resultante do modelo é a melhor para a tomada de decisão, considerando todas as especificações do caso. A metodologia apresentada é um sistema de suporte à decisão, o que significa que deve auxiliar para que a melhor decisão seja tomada e não resultar na decisão final sem discussão. As análises de sensibilidade tem o papel de orientar a discussão sobre os resultados, questionando os valores por trás dos mesmos e estimulando a reflexão sobre a adequação da solução ao caso proposto.

Comparando os resultados do caso apresentado sob duas configurações de solução: multicritério combinatória com priorização de Custo e Emissões de GEE (original) e multicritério combinatória com priorização de Emissões de GEE e Prazo de Entrega (análise de sensibilidade), percebe-se que a única escolha de fornecedor divergente entre elas é para o item 7, que na solução original é provido pelo fornecedor 4, e na análise de sensibilidade passa ao fornecedor 2. Esta mudança trás um pequeno aumento no custo e nas emissões de GEE, como já mencionado na seção anterior deste texto, porém reduz o *lead time* médio em 8 dias e o *lead time* deste item especificamente em 21 dias (75 para 54 dias), um tempo considerável na dinâmica do negócio.

Esta solução também reduz o número de fornecedores escolhidos, pois encontra seu ponto ótimo com 4 fornecedores, excluindo o fornecedor 4. Comparada com a solução original restrita a 4 fornecedores há uma seleção diferente, pois esta mantém o fornecedor 4 e exclui o fornecedor 5, reduzindo o custo em R$ 84,4 mil/ano e aumentando as emissões de GEE em 199,5 t CO_{2e}/ano. No entanto, apesar da redução de custo a solução original com 4 fornecedores tem maior risco de desabastecimento porque o fornecedor 1 ganha 4 itens, e pode não ter condições de produzir todos em paralelo em um momento de alta demanda. O mesmo não ocorre na solução obtida da análise de sensibilidade, na qual o máximo número de itens por fornecedor é três. Somado à redução no prazo de entrega e à pequena variação nos outros atributos, pode-se concluir que para este caso a solução decorrente da análise de sensibilidade é a mais adequada neste contexto.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs uma solução para o problema de seleção de fornecedores utilizando otimização multicritério combinatória, com base em funções de valor e constantes de escala atribuídas a quatro atributos com propriedades sistêmicas. O caso apresentado é uma adaptação de um problema real de uma empresa brasileira de cosméticos, para a qual as decisões devem ser tomadas de forma sustentável, considerando aspectos econômicos, sociais e ambientais. No entanto, suas aplicações são extensivas a diversos outros setores e tipos de fornecimento já que o aumento na complexidade da decisão e necessidade de ponderar diversos benefícios é fator comum a diversos ambientes institucionais.

O tema desenvolvido contribuiu para a literatura, trazendo uma nova abordagem para o problema de seleção de fornecedores combinando MCDA e programação linear com variáveis binárias e leilões combinatórios, ainda pouco explorada. A aplicação prática da metodologia em um ambiente empresarial gerou discussões relevantes sobre o assunto e trouxe resultados interessantes que ressaltaram a importância da utilização da metodologia na Indústria, o que é encontrado na literatura acadêmica em alguns casos aplicados como Hohner et al. (2003), Sandholm et al. (2006), Handfield et al. (2002) e Talluri e Narasimhan (2004), porém em uma indústria distinta e com outros modelos de abordagem. Entretanto, o desenvolvimento teórico da metodologia MCDA pode ser mais explorado em trabalhos acadêmicos futuros, evoluindo a aplicação prática realizada neste trabalho de forma fundamentada.

Um ponto forte do modelo é a possibilidade de avaliar aspectos de sustentabilidade como atributos de decisão, uma preocupação crescente das empresas e já ilustrada por Humpheys, Wong e Chan (2003), que indica que o melhor método para melhorar o desempenho sustentável de uma indústria é integrar sua gestão ambiental com a cadeia de suprimentos. No entanto, não foi possível utilizar no caso aplicado um atributo social, estando presentes aspectos de nível de serviço, econômicos e ambientais, e todos foram quantitativos. Uma sugestão para continuidade deste trabalho é a consideração de atributos qualitativos, como são em geral os aspectos sociais, que devem ser quantificados de acordo com os conceitos do grupo decisor,

com auxílio de um facilitador se não for utilizada a abordagem especialista.

A metodologia permite a adição de atributos conforme as prioridades da empresa em questão, podendo ser utilizada em diversas aplicações distintas de forma customizada. Um novo atributo interessante a ser considerado futuramente, que requer atenção constante de suprimentos, é o risco de desabastecimento, que contrasta com a complexidade de gestão da base de fornecedores, pois este almeja menos fornecedores enquanto aquele, mais. Um tema relacionado a esta característica e não abordado nesta dissertação é a inclusão de novos fornecedores, que deve abordar como gerir o risco de contratação de desconhecidos e compará-los com fornecedores incumbentes de forma igualitária.

Os resultados obtidos mostraram de forma direta que a abordagem multicritérios é essencial para que a seleção de fornecedores seja adequada aos objetivos fundamentais da organização, sendo superior em valor às escolhas baseadas em somente um atributo. Além disso, as decisões de fornecimento influenciam toda estratégia da empresa, sendo imprescindível que ambas estejam alinhadas, o que é possível através da metodologia MCDA proposta, que pondera e aplica de forma clara e objetiva os fatores críticos para decisão.

A aplicação da otimização combinatória, não explorada na prática de compras da indústria cosmética, se mostrou vantajosa. Os resultados apresentados provam que existem muitas oportunidades de ganhos neste ponto, pois em uma linha de produtos muitos itens têm características similares e complementares, e diversas sinergias podem ser exploradas entre eles, trazendo ganhos tanto para a empresa compradora como para os fornecedores, o que pode ser mais explorado na realidade das empresas. Alguns exemplos da literatura, como Hohner et al. (2003), Sandholm et al. (2006) e Catalán et al. (2009) ilustraram estudos de caso enumerando os ganhos desta implantação combinatória, porém distinguindo-se do presente trabalho pelo não detalhamento da condução do MCDA e do processo de tomada de decisão e também por focarem principalmente em custos.

O modelo matemático foi inicialmente desenvolvido no *MS-Excel*, que é um software largamente conhecido e utilizado em empresas, para que a interface com o usuário no ambiente organizacional fosse fácil, dando foco aos parâmetros e resultados e não à modelagem matemática. No entanto, o pacote *Solver* para resolução de problemas de pesquisa operacional incluso no software *MS-Excel* não teve capacidade suficiente para lidar com o número de variáveis e complexidade do

problema, sendo possível sua resolução apenas através do *Premium Solver Plataform*, que é um software a parte que roda dentro do ambiente do *MS-Excel*. Por ser um problema NP completo, só é possível a sua resolução por este método devido à sua dimensão reduzida (5 fornecedores e 10 propostas por fornecedor, sendo 147 variáveis no total). Bichler e Kalagnanam (2005) dizem que softwares de programação inteira que usam algoritmos *branch-and-bound*, como o *Solver*, são capazes de resolver em tempo hábil problemas de até 200 propostas e 20 atributos. Acima desta dimensão o tempo computacional aumenta exponencialmente, justificando o uso de heurísticas para solução.

Apesar de o modelo desenvolvido ser prático e de fácil interface para utilização na dinâmica rotina empresarial, uma das dificuldades encontradas foi a construção do modelo em paralelo com o desenvolvimento das embalagens. O tempo consumido para discutir e entrar em consenso sobre os valores, atributos, ponderações e funções de valor pela primeira vez é grande, e não está contemplado no projeto de um novo produto, fato que fez com que o modelo fosse desenvolvido de forma mista, inicialmente com o grupo com auxílio de um facilitador e ao final somente pela comparadora especialista. Além de que se cometem alguns erros no percurso, como eleger atributos que não diferenciam os fornecedores, duplicar a avaliação sobre a mesma coisa ou medir de forma exacerbada um dos atributos.

Portanto, uma recomendação para prosseguimento desta pesquisa com foco na aplicação prática é a estruturação de alguns padrões previamente preparados para o ambiente que irão ser utilizados, cada um com foco em um objetivo, criando um sistema de suporte à decisão. Estes padrões devem ser discutidos de forma completa ao serem construídos, para que depois possam ser replicados em casos similares e a discussão sobre a adequação do padrão àquele caso específico seja rápida e prática. Por exemplo para o tema desta dissertação, embalagens para cosméticos, poderiam ser criados diferentes padrões para projetos com objetivo de baixo custo, alta tecnologia, uso de materiais sustentáveis e rápido lançamento no mercado, entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGERON, B.; GUNASEKARAN, A.; SPALANZANI, A. Sustainable Supply Management: An Empirical Study. **International Journal of Production Economics**, doi: 10.1016/j.ijpe.2011.04.007, 2011.

AVENALI, A. Exploring the VCG Mechanism in Combinatorial Auctions: The Threshold Revenue and the Threshold-Price Rule. **European Journal of Operational Research**, v. 199, p.262-275, 2009.

BAI, C.; SARKIS, J. Integrating Sustainability into Supplier Selection with Grey System and Rough Set Methodologies. **International Journal of Production Economics**, v. 124, p.252-264, 2010.

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

BICHLER, M. An Experimental Analysis of Multi-attribute Auctions. **Decision Support Systems**, v. 29, p.249-268, 2000.

BICHLER, M.; KALAGNANAM, J. Configurable Offers and Winner Determination in Multi-attribute Auctions. **European Journal of Operational Research**, v. 160, p.380-394, 2005.

BICHLER, M.; SCHNEIDER, S.; GULER, K.; SAYAL, M. Compact Bidding and Supplier Selection for Markets with Economies of Scale and Scope. **European Journal of Operational Research**, v. 214, p.67-77, 2011.

BOWEN, F.; COUSINS, P.; LAMMING, R.; FARUK, A. The Role of Supply Management Capabilities in Green Supply. **Production and Operations Management**, v. 10, n. 2, p.174-189, 2001.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. **Gestão Logística de Cadeias de Suprimentos**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

CAPLICE, C.; SHEFFI, Y. Optimization-based Procurement for Transportation Services. **Journal of Business Logistics**, v. 24, n. 2, p.109-128, 2003.

CARTER, C. R.; ROGERS, D. S. A Framework of Sustainable Supply Chain Management: Moving Toward New Theory. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 85, n. 5, p.360-387, 2008.

CATALÁN, J.; EPSTEIN, R.; GUAJARDO, M.; YUNG, D.; MARTÍNEZ, C. Solving Multiple Scenarios in a Combinatorial Auction. **Computers & Operations Research**, v. 36, p.2752-2758, 2009.

CRAMTON, P.; SHOHAM, Y.; STEINBERG, R. **Combinatorial Auctions**. Cambridge, MA: MIT Press, 2006.

DAHEL, N. E. Vendor Selection and Order Quantity Allocation in Volume Discount Environments. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 8, n. 4, p.335-342, 2003.

DE BOER, L.; LABRO, E.; MORLACCHI, P. A Review of Methods Supporting Supplier Selection. **European Journal of Purchasing & Supply Management**, v. 7, n. 2, p.75-89, 2001.

DE SMET, Y. Multi-criteria Auctions without Full Comparability of Bids. **European Journal of Operational Research**, v. 177, p.1433-1452, 2007.

DEGRAEVE, Z.; LABRO, E.; ROODHOOFT, F. An Evaluation of Supplier Selection Methods from a Total Cost of Ownership Perspective. **European Journal of Operational Research**, v. 125, n. 1, p.34-58, 2000.

EHRGOTT, M.; GANDIBLEUX, X. A Survey and Annotated Bibliography of Multiobjective Combinatorial Optimization. **OR Spektrum**, v. 22, p.425-460, 2000.

ESTY, D. C.; WINSTON, A. S. **Green to Gold:** How Smart Companies Use Environmental Strategy to Innovate, Create Value, and Build Competitive Advantage. New Haven: Yale University Press, 2006.

FISHER, M. L. What is the Right Supply Chain for your Product?. **Harvard Business Review**, v. 75 n. 2, p.105-116, 1997.

FRANCO, L. A.; MONTIBELLER, G. Facilitated Modeling in Operational Research. **European Journal of Operational Research**, v. 205, n. 3, p.489-500, 2010.

FRANCO, L. A.; MONTIBELLER, G. Problem Structuring for Multi-Criteria Decision Analysis Interventions. **The London School of Economics and Political Science - Department of Management**. Boletim Técnico, London, 2009.

GOODWIN, P.; WRIGHT, G. **Decision Analysis for Management Judgment**. United Kingdom: Wiley, 2004.

HANDFIELD, R.; WALTON, S. V.; SROUFE, R.; MELNYK, S. A. Applying Environmental Criteria to Supplier Assessment: A Study in the Application of Analytical Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, v. 141, p.70-87, 2002.

HO, W.; XU, X.; DEY, P. K. Multi-criteria Decision Making Approaches for Supplier Evaluation and Selection: A Literature Review. **European Journal of Operational Research**, v. 202, n. 1, p.16-24, 2010.

HOHNER, G.; RICH, J.; NG, E.; REID, G.; DAVENPORT, A. J.; KALAGNANAM, J. R.; LEE, H. S.; AN, C. Combinatorial and Quantity-Discount Procurement Auctions Benefit Mars, Incorporated and Its Suppliers. **Interfaces**, v. 33, n. 1, p.23-35, 2003.

HUMPHREYS, P. K.; WONG, Y. K.; CHAN, F. T. S. Integrating Environmental Criteria into the Supplier Selection Process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 138, n. 2, p.349-356, 2003.

KEENEY, R. L. Value Focused Thinking: Identifying Decision Opportunities and Creating Alternatives. **European Journal of Operational Research**, v. 92, p.537-549, 1996.

KEENEY, R. L. **Value-Focused Thinking**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1992.

KEENEY, R. L. Decision Analysis: An Overview. **Operations Research**, v. 30, n. 5, p.803-838, 1982.

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

KÖKSALAN, M.; LESKELÄ, R. L.; WALLENIUS, H.; WALLENIUS, J. Improving Efficiency in Multiple-Unit Combinatorial Auctions: Bundling Bids from Multiple Bidders. **Decision Support Systems**, v. 48, p.103-111, 2009.

KOPLIN, J.; SEURING, S.; MESTERHARM, M. Incorporating Sustainability into Supply Management in the Automotive Industry – The Case of the Volkswagen AG. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, p.1053-1062, 2007.

LARGE, R. O.; THOMSEN, C. G. Drivers of Green Supply Management Performance: Evidence from Germany. **Journal of Purchasing & Supply Management**, v. 17, p.176-184, 2011.

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

LUO, X.; WU, C.; ROSENBERG, D.; BARNES, D. Supplier Selection in Agile Supply Chains: An Information-processing Model and a Illustration. **Journal of Purchasing & Supply Management**, v. 15, n. 4, p.249-262, 2009.

MONTIBELLER, G.; FRANCO, L. A. Decision and Risk Analysis for the Evaluation of Strategic Options. In: O'BRIEN, F.A.; DYSON, R. G. (eds.) **Supporting Strategy:** Frameworks, Methods and Models. Chichester: Wiley, 2007.

MONTIBELLER, G.; YOSHIZAKI, H. T. Y. A Framework for Locating Logistic Facilities with Multi-Criteria Decision Analysis. In: TAKAHASHI, R. H. C. et al. (eds.) **Evolutionary Multi-criterion Optimization**, Lecture notes in computing science, v. 6576, p.505-519. Berlin: Springer-Verlag, 2011.

NARASIMHAN, R.; TALLURI, S.; MAHAPATRA, S. Effective Response to RFQs and Supplier Development: A Supplier's Perspective. **International Journal of Production Economics**, v. 115, p.461-470, 2008.

PIDD, M. Just Modeling Through: A Rough Guide to Modeling. **Interfaces**, v. 29, n. 2 p.118-132, 1999.

PHILLIPS, L. D.; BANA E COSTA, C. A. Transparent Prioritisation, Budgeting and Resource Allocation with Multi-criteria Decision Analysis and Decision Conferencing. **Annals of Operations Research**, v. 154, n. 1, p.51-68, 2007.

PRADO, A. A. A. **Análise de Decisão Multicritério Aplicada na Seleção de Fornecedores de Logística**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PREUSS, L. In Dirt Chains? Purchasing and Greener Manufacturing. **Journal of Business Ethics**, v. 34, n. 3-4, p.345-359, 2001.

RAO, P.; HOLT, D. Do Green Supply Chains Lead to Competitiveness and Economic Perfomance?. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 25, n. 9, p.898-916, 2005.

SANDHOLM, T. Approaches to Winner Determination in Combinatorial Auctions. **Decision Support Systems**, v. 28, p.165-176, 2000.

SANDHOLM, T.; LEVINE, D.; CONCORDIA, M.; MARTYN, P.; HUGHES, R.; JACOBS, J.; BEGG, D. Changing the Game in Strategic Sourcing at Procter & Gamble: Expressive Competition Enabled by Optimization. **Interfaces**, v. 36, n. 1, p.55-68, 2006.

SEREF, M. M. H.; AHUJA, R. K.; WINSTON, W. L. **Developing Spreadsheet-Based Decision Support Systems** – Using Excel and VBA for Excel. Belmont: Dynamic Ideas, 2007.

SONMEZ, M. A Review and Critique of Supplier Selection Process and Practices. **Business School Occasional Papers Series**, Paper 2006:1, Loughborough University, 2006.

TALLURI, S.; NARASIMHAN, R. A Methodology for Strategic Sourcing. **European Journal of Operational Research**, v. 154, p.236-250, 2004.

TEICH, J. E.; WALLENIUS, H.; WALLENIUS, J.; KOPPIUS, O. R. Emerging Multiple Issue E-auctions. **European Journal of Operational Research**, v. 159, p.1-16, 2004.

ULUNGU, E. L.; TEGHEM, J; FORTEMPS, P. H.; TUYTTENS, D. MOSA Method: A Tool for Solving Multiobjective Combinatorial Optimization Problems. **Journal of Multi-criteria Decision Analysis**, v. 8, p.221-236, 1999.

WEBER, C. A.; CURRENT, J. R.; BENTON, W. C. Vendor Selection Criteria and Methods. **European Journal of Operational Research**, v. 50, p.2-18, 1991.

WADHWA, V.; RAVINDRAN, A. R. Vendor Selection in Outsourcing. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 12, p.3725-3737, 2007.

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**, v. 54, n. 7, p.1336-1349, 2008.

WINSTON, W. L.; VENKATARAMANAN, M. **Introduction to Mathematical Programming**. 4th ed. Pacific Grove: Thomson Books/Cole, 2003.

XIA, W.; WU, Z. Supplier Selection with Multiple Criteria in Volume Discount Environments. **Omega**, v. 35, n. 5, p.494-504, 2007.

YEN, Y-X.; YEN, S-Y. Top-Management's Role in Adopting Green Purchasing Standards in High-Tech Industrial Firms. **Journal of Business Research**, doi: 10.1016/j.jbusres.2011.05.002, 2011.

ZHU, Q.; SARKIS, J. Relationships between Operational Practices and Perfomance among Early Adopters of Green Supply Chain Management Practices in Chinese Manufacturing Enterprises. **Journal of Operations Management**, v. 22, n. 3, p.265-289, 2004.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS COMPLEMENTARES

ABIHPEC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE HIGIENE PESSOAL, PERFUMARIA E COSMÉTICOS. Disponível em < http://www.abihpec.org.br>. Acesso em 13 mai. 2011.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos** / **Logística Empresarial**. 5ª ed. São Paulo: Bookman, 2004.

BORNSTEIN, C. T.; MACULAN, N.; PASCOAL, M.; PINTO, L. L. Multiobjective Combinatorial Optimization Problems with a Cost and Several Bottleneck Objective Functions: An Algorithm with Reoptimization. **Computers & Operations Research**, doi: 10.1016/j.cor.2011.09.006, 2011.

BRADLEY, S; HAX, A.; MAGNANTI, T. **Applied Mathematical Programming**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1977.

BRINATI, M. **Programação Matemática Aplicada a Problemas de Transportes (PNV5761)**. Notas de aula (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CUNHA, C. B. **Pesquisa Operacional Aplicada à Logística e ao Planejamento e Operação de Transportes (PTR5744)**. Notas de aula (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

DYER, J. S. Remarks on the Analytic Hierarchy Process. **Management Science**, v. 36, n. 3, p.249-258, 1990.

EHRGOTT, M. **Multicriteria Optimization**. Heidelberg: Springer Berlin, 2005.

GUALDA, N. D. F. **Análise e Avaliação de Sistemas de Transportes (PTR5732)**. Notas de aula (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

GUALDA, N. D. F. **Terminais de Transportes (PTR5733)**. Notas de aula (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

GUTIERREZ, C. J. **Development and Application of a Linear Programming Model to Optmize Production and Distribution of a Manufacturing Company**. 1996. Thesis (Master of Science in Transportation) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 1996.

HARDIN, G. The Tragedy of the Commons. **Science**, v. 162, p.1243-1248, 1968.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. 7th ed. New York: McGrall-Hill, 2001.

KANGAS, A.; KANGAS, J.; KURTTILA, M. **Decision Support for Forest Management**. Springer, 2008 (Série Managing Forest Ecosystems, v. 16)

KLAMROTH, K. Discrete Multiobjective Optimization. In: EHRGOTT, M.; FONSECA, C. M.; GANDIBLEUX, X.; HAO, J-K; SEVAUX, M. (eds.) **Evolutionary Multi-criterion Optimization**, Lecture notes in computing science, v. 5467, p.4, Nantes: Springer, 2009.

KRISHNA, V. **Auction Theory**. 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, 2009.

MENTZER, J. T.; DE WITT, W; KEEBLER, J. S.; MIN, S.; NIX, N. W. SMITH, C. D.; ZACHARIA, Z.G. Defining Supply Chain Management. **Journal of Business Logistics**, v. 22, n. 2, p.1-25, 2001.

MILGROM, P. R.; WEBER, R. J. A Theory of Auctions and Competitive Bidding. **Econometrica**, v. 50, n. 5, p.1089-1122, 1982.

MONTIBELLER, G. **Decisões Estratégicas em Sistemas Logísticos (PRO6001)**. Notas de aula (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

NATURA. **Relatório anual** – Edição Especial para Colaboradores. Cajamar, 2010.

RASSENTI, S. J.; SMITH, V. L.; BULFIN, R. L. A Combinatorial Auction Mechanism for Airport Time Slot Allocation. **The Bell Journal of Economics**, v. 13, n. 2, p.402-417, 1982.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SANDHOLM, T.; SURI, S. Side Constraints and Non-Price Attributes in Markets. **Games and Economic Behaviour**, v. 55, p.321-330, 2006.

SHEFFI, Y. **Risks and Supply Contracts**. Notas de aula (Graduate Certificate in Global Logistics & Supply Chain Management – GC-LOG) – Massachusetts Institute of Technology, Bogotá, Colombia, 2011.

TEGHEM, J. Multiple Objective Linear Programming. In: BOUYSSOU, D.; DUBOIS, D.; PRADE, H.; PIRLOT, M. (eds.) **Decision Making Process:** Concepts and Methods. Londres: Wiley, 2009.

ULUNGU, E. L.; TEGHEM, J. Multi-objective Combinatorial Optimization Problems: A Survey. **Journal of Multi-criteria Decision Analysis**, v. 3, p.83-104, 1994.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Sistema Integrado de Bibliotecas da USP. **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses da USP:** documento eletrônico e impresso Parte I (ABNT). 2ª ed. São Paulo, 2009.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Politécnica – Divisão de Biblioteca. **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses**. 3ª ed. São Paulo, 2006.

VICKREY, W. Counter Speculations, Auctions and Competitive Bid Tenders. **Journal of Finance**, v. 16, p.8-37, 1961.

VRIES, S.; SCHUMMER, J.; VOHRA, R. V. On Ascending Vickrey Auctions for Heterogeneous Objects. **Journal of Economic Theory**, v. 132, p.95-118, 2007.

WU, C.; BARNES, D. A Literature Review of Decision-making Models and Approaches for Partner Selection in Agile Supply Chains. **Journal of Purchasing & Supply Management**, v. 17, p.256-274, 2011.

YOSHIZAKI, H. T. Y. **Logística Industrial e Cadeia de Suprimentos (PRO5807)**. Notas de aula (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

APÊNDICE A – Modelagem Solver

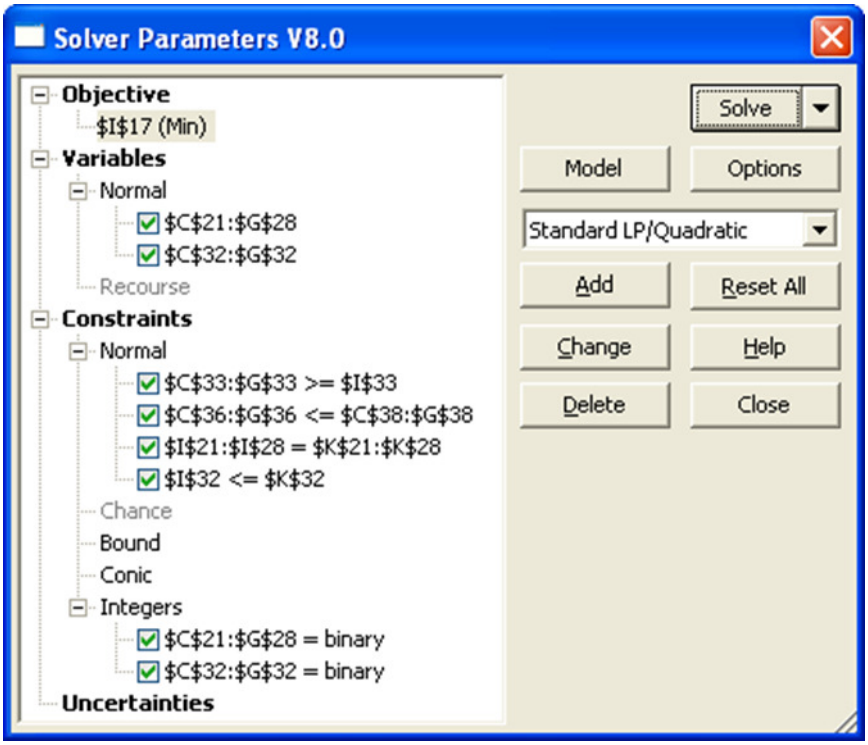
As modelagens feitas no *MS-Excel* e resolvidas pelo *Premium Solver Plataform* (versão 8.0) seguiram a seguinte notação:

PADRONIZAÇÃO UTILIZADA NAS MODELAGENS DO SOLVER

- Função Objetivo multicritério
- Função Objetivo
- Variável de decisão primária
- Variável de decisão secundária (multicritério)
- Restrição / dados do problema

A seguir são mostradas todas as modelagens (telas do *MS-Excel*) e parâmetros configurados para resolução no *Premium Solver Plataform*, para as otimizações monocriteriais, multicriterial e multicriterial com combinatório.

OTIMIZAÇÃO MONOCRITERIAL



Parâmetros configurados no *Premium Solver* para as otimizações monocriteriais.

Obs: Para todos os atributos os parâmetros foram os mesmos, alterando-se apenas os dados de entrada de cada um dos atributos.

Otimização do Custo Total

CASO 1A **OTIMIZAÇÃO SOMENTE POR CUSTO TOTAL**

Encontrar a combinação de fornecedores que traga o menor custo total de contratação.

Restrições: cada item é fornecido por somente 1 fornecedor (não há quotização).

Dados de entrada

Custos de contratação em mR$/ano

	F1	F2	F3	F4	F5	
I1	312.2	313.8	315.8	306.1	310.2	306.1
I2	1,127.4	1,322.7	1,209.2	1,109.6	1,211.9	1109.6
I3	174.0	179.7	179.6	155.7	163.5	155.7
I4	1,075.6	1,131.9	961.7	960.2	1,006.5	960.2
I5	666.7	591.5	755.6	633.3	716.4	591.5
I6	595.6	691.9	694.0	632.2	560.2	560.2
I7	825.9	1,067.2	871.7	846.4	1,029.3	825.9
I8	245.8	244.1	303.8	282.6	264.0	244.1

Custo total

4,753

Alocação dos itens por fornecedor

	F1	F2	F3	F4	F5			Exclusividade de fornecimento
I1	0	0	0	1	0	1	=	1
I2	0	0	0	1	0	1	=	1
I3	0	0	0	1	0	1	=	1
I4	0	0	0	1	0	1	=	1
I5	0	1	0	0	0	1	=	1
I6	0	0	0	0	1	1	=	1
I7	1	0	0	0	0	1	=	1
I8	0	1	0	0	0	1	=	1

Número de fornecedores

	F1	F2	F3	F4	F5		nº fornecedores		
yj	1	1	0	1	1		4	<=	4
	15	31	0	63	15	>=	0		

Contagem de fornecedores

soma Xij em i	1	2	0	4	1
	<=	<=	<=	<=	<=
M*Yj	100	100	0	100	100

Tela da modelagem no *MS-Excel* para o atributo Custo

Otimização das Emissões de GEE

CASO 1B OTIMIZAÇÃO SOMENTE POR EMISSÕES DE GEE

Encontrar a combinação de fornecedores que traga a menor quantidade de emissão de CO2e.

Restrições: cada item é fornecido por somente 1 fornecedor (não há quotização).

Dados de entrada

Emissão de GEE em t/ano

	F1	F2	F3	F4	F5	
I1	260.6	143.0	348.4	295.9	253.3	143.0
I2	712.4	752.4	535.5	581.1	512.9	512.9
I3	274.1	197.3	178.1	221.3	183.2	178.1
I4	495.5	890.9	532.3	951.5	951.2	495.5
I5	732.3	555.0	950.4	909.6	948.4	555.0
I6	302.3	550.7	459.8	507.4	427.8	302.3
I7	604.0	366.5	625.7	453.5	503.4	366.5
I8	144.4	165.3	139.3	107.9	224.9	107.9

Emissões totais

2,661.2

Alocação dos itens por fornecedor

	F1	F2	F3	F4	F5			Exclusividade de fornecimento
I1	0	1	0	0	0	1	=	1
I2	0	0	0	0	1	1	=	1
I3	0	0	1	0	0	1	=	1
I4	1	0	0	0	0	1	=	1
I5	0	1	0	0	0	1	=	1
I6	1	0	0	0	0	1	=	1
I7	0	1	0	0	0	1	=	1
I8	0	0	0	1	0	1	=	1

Número de fornecedores

	F1	F2	F3	F4	F5		nº fornecedores		
yj	1	1	1	1	1		**5**	<=	5
	31	47	15	15	15	>=	0		

Contagem de fornecedores

soma Xij em i	2	3	1	1	1
	<=	<=	<=	<=	<=
M*Yj	100	100	100	100	100

Tela da modelagem no *MS-Excel* para o atributo Emissões de GEE

Otimização do Prazo de Desenvolvimento

CASO 1C OTIMIZAÇÃO SOMENTE POR PRAZO DE DESENVOLVIMENTO

Encontrar a combinação de fornecedores que traga o menor prazo de desenvolvimento total.

Restrições: cada item é fornecido por somente 1 fornecedor (não há quotização).

Dados de entrada

Prazo de desenvolvimento em dias

	F1	F2	F3	F4	F5	
I1	218	210	233	192	238	192
I2	186	188	239	228	193	186
I3	214	220	212	226	221	212
I4	185	246	182	234	196	182
I5	208	244	190	219	225	190
I6	185	200	214	247	193	185
I7	219	210	240	207	207	207
I8	232	211	184	245	239	184
						Maior prazo
						212

Alocação dos itens por fornecedor

	F1	F2	F3	F4	F5			Exclusividade de fornecimento
I1	0	0	0	1	0	1	=	1
I2	1	0	0	0	0	1	=	1
I3	0	0	1	0	0	1	=	1
I4	0	0	1	0	0	1	=	1
I5	0	0	1	0	0	1	=	1
I6	1	0	0	0	0	1	=	1
I7	0	0	0	1	0	1	=	1
I8	0	0	1	0	0	1	=	1

Número de fornecedores

	F1	F2	F3	F4	F5		nº fornecedores		
yj	1	0	1	1	0		**3**	<=	3
	31	0	63	31	0	>=	0		

Contagem de fornecedores

soma Xij em i	2	0	4	2	0
	<=	<=	<=	<=	<=
M*Yj	100	0	100	100	0

Tela da modelagem no *MS-Excel* para o atributo Prazo de Desenvolvimento

Otimização do Prazo de Entrega

CASO 1D OTIMIZAÇÃO SOMENTE POR PRAZO DE ENTREGA (LEAD TIME)

Encontrar a combinação de fornecedores que traga o menor prazo de entrega médio (lead time).

Restrições: cada item é fornecido por somente 1 fornecedor (não há quotização).

Dados de entrada

Prazo de entrega em dias

	F1	F2	F3	F4	F5	
I1	55	25	57	75	25	25
I2	67	53	68	32	57	32
I3	63	79	89	76	89	63
I4	41	52	42	29	59	29
I5	34	69	72	83	57	34
I6	81	76	77	45	40	40
I7	61	54	29	75	88	29
I8	59	68	31	56	86	31

Prazo médio

35

Alocação dos itens por fornecedor

	F1	F2	F3	F4	F5			Exclusividade de fornecimento
I1	0	0	0	0	1	1	=	1
I2	0	0	0	1	0	1	=	1
I3	1	0	0	0	0	1	=	1
I4	0	0	0	1	0	1	=	1
I5	1	0	0	0	0	1	=	1
I6	0	0	0	0	1	1	=	1
I7	0	0	1	0	0	1	=	1
I8	0	0	1	0	0	1	=	1

Número de fornecedores

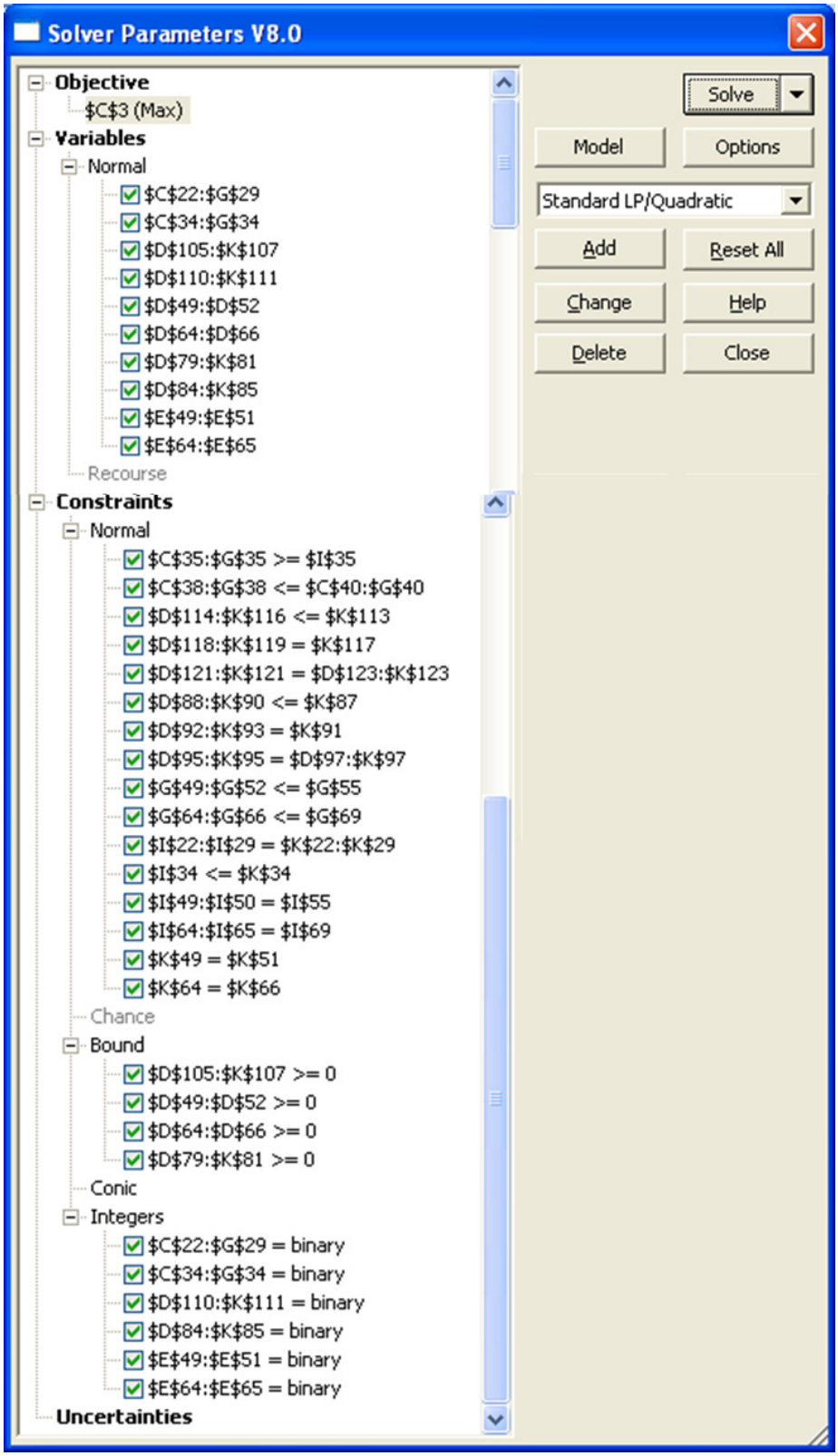
	F1	F2	F3	F4	F5		nº fornecedores		
yj	1	0	1	1	1		**4**	<=	4
	31	0	31	31	31	>=	0		

Contagem de fornecedores

soma Xij em i	2	0	2	2	2
	<=	<=	<=	<=	<=
M*Yj	100	0	100	100	100

Tela da modelagem no *MS-Excel* para o atributo Prazo de Entrega

OTIMIZAÇÃO MULTICRITERIAL



Parâmetros configurados no *Premium Solver* para a otimização multicriterial

CASO 2 OTIMIZAÇÃO MULTI-CRITÉRIOS

FO 82.92

Ponderação dos critérios (k)

	Custo	*Emissão*	*T desenv.*	*Lead time*
Pesos	0.377	0.283	0.226	0.113
Valores	84.04	83.51	90.00	63.52

PRIORIZAÇÃO DOS PESOS ENTRE OS CRITÉRIOS

	Custo	*Emissão*	*T desenv.*	*Lead time*
	100	*75*	*60*	*30*
100				
0				

Alocação dos itens por fornecedor

	F1	F2	F3	F4	F5			Exclusividade de fornecimento
I1	0	1	0	0	0	1	=	1
I2	0	0	0	0	1	1	=	1
I3	0	0	1	0	0	1	=	1
I4	0	0	1	0	0	1	=	1
I5	1	0	0	0	0	1	=	1
I6	1	0	0	0	0	1	=	1
I7	0	0	0	1	0	1	=	1
I8	0	0	1	0	0	1	=	1

Número de fornecedores

	F1	F2	F3	F4	F5		nº fornecedores		
yj	1	1	1	1	1		5	<=	5
	199	99	299	99	99	>=	0		

Contagem de fornecedores

soma Xij em i	2	1	3	1	1
	<=	<=	<=	<=	<=
M*Yj	100	100	100	100	100

Tela da modelagem no *MS-Excel* para a otimização multicriterial (imagem 1 de 4)

CUSTO TOTAL

Valor 84.04

f(x)	c	zc	ac	*Piecewise constraint*	*Proporcionalidade*	*Adequação à FO*
0	5,770	0	0	0	1	5,079.5
60	5,400	0	1	-1	1	=
90	5,000	1	0	0		**5,079.5**
100	4,753	0		0		
Intervalo	1017.0					(custo total de contratação)
Delta	101.7			<=	=	
				0	1	

Custo total de contratação em MM R$/ano

	F1	F2	F3	F4	F5
I1	312.2	313.8	315.8	306.1	310.2
I2	1,127.4	1,322.7	1,209.2	1,109.6	1,211.9
I3	174.0	179.7	179.6	155.7	163.5
I4	1,075.6	1,131.9	961.7	960.2	1,006.5
I5	666.7	591.5	755.6	633.3	716.4
I6	595.6	691.9	694.0	632.2	560.2
I7	825.9	1,067.2	871.7	846.4	1,029.3
I8	245.8	244.1	303.8	282.6	264.0

EMISSÕES DE GEE

Valor 83.51

f(x)	e	ze	ae	*Piecewise constraint*	*Proporcionalidade*	*Adequação à FO*
0	4,679	0	0	0	1	2,993.7
50	3,670	0	1	-1	1	=
100	2,661	1		0		**2,993.7**
Intervalo	2018.0					
Delta	201.8			<=	=	(total de emissões)
				0	1	

Emissões de GEE em t/ano

	F1	F2	F3	F4	F5
I1	260.6	143.0	348.4	295.9	253.3
I2	712.4	752.4	535.5	581.1	512.9
I3	274.1	197.3	178.1	221.3	183.2
I4	495.5	890.9	532.3	951.5	951.2
I5	732.3	555.0	950.4	909.6	948.4
I6	302.3	550.7	459.8	507.4	427.8
I7	604.0	366.5	625.7	453.5	503.4
I8	144.4	165.3	139.3	107.9	224.9

Tela da modelagem no *MS-Excel* para a otimização multicriterial (imagem 2 de 4)

PRAZO DE DESENVOLVIMENTO

	Valores	90.67	96.33	90.00	100.00	91.33	99.00	91.67	99.33
f(x)	t	zt1	zt2	zt3	zt4	zt5	zt6	zt7	zt8
0	247	0	0	0	0	0	0	0	0
90	212	1	0	1	0	1	0	1	0
100	182	0	1	0	1	0	1	0	1
Intervalo	65.0								
Delta	6.5	at1	at2	at3	at4	at5	at6	at7	at8
		0	0	0	0	0	0	0	0
		1	1	1	1	1	1	1	1
		Piecewise constraints						<=	0
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	-1	0	-1	0	-1	0	-1
		-1	0	-1	0	-1	0	-1	0
		Proporcionalidade						=	1
		1	1	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	1	1	1	1
		Adequação à FO							
		210	193	212	182	208	185	207	184
		=	=	=	=	=	=	=	=
		210	193	212	182	208	185	207	184

Prazo de desenvolvimento em dias

	F1	F2	F3	F4	F5
I1	218	210	233	192	238
I2	186	188	239	228	193
I3	214	220	212	226	221
I4	185	246	182	234	196
I5	208	244	190	219	225
I6	185	200	214	247	193
I7	219	210	240	207	207
I8	232	211	184	245	239

212 prazo total de desenvolvimento

Tela da modelagem no *MS-Excel* para a otimização multicriterial (imagem 3 de 4)

PRAZO DE ENTREGA

	Valores	100.00	72.00	0.00	92.92	96.25	18.00	31.50	97.50
f(x)	I	zl1	zl2	zl3	zl4	zl5	zl6	zl7	zl8
0	89	0	0.2	1	0	0	0.8	0.65	0
90	49	0	1	0	1	0	0	0	0
100	25	1	0	0	0	1	0	0	1
Intervalo	64.0								
Delta	6.4	al1	al2	al3	al4	al5	al6	al7	al8
		0	1	1	0	0	1	1	0
		1	0	0	1	1	0	0	1
		Piecewise constraints						<=	0
		0	-0.8	0	0	0	-0.2	-0.35	0
		-1	0	-1	0	-1	-1	-1	-1
		0	0	0	-1	0	0	0	0
		Proporcionalidade						=	1
		1	1	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	1	1	1	1
		Adequação à FO							
		25	57	89	42	34	81	75	31
		=	=	=	=	=	=	=	=
		25	57	89	42	34	81	75	31

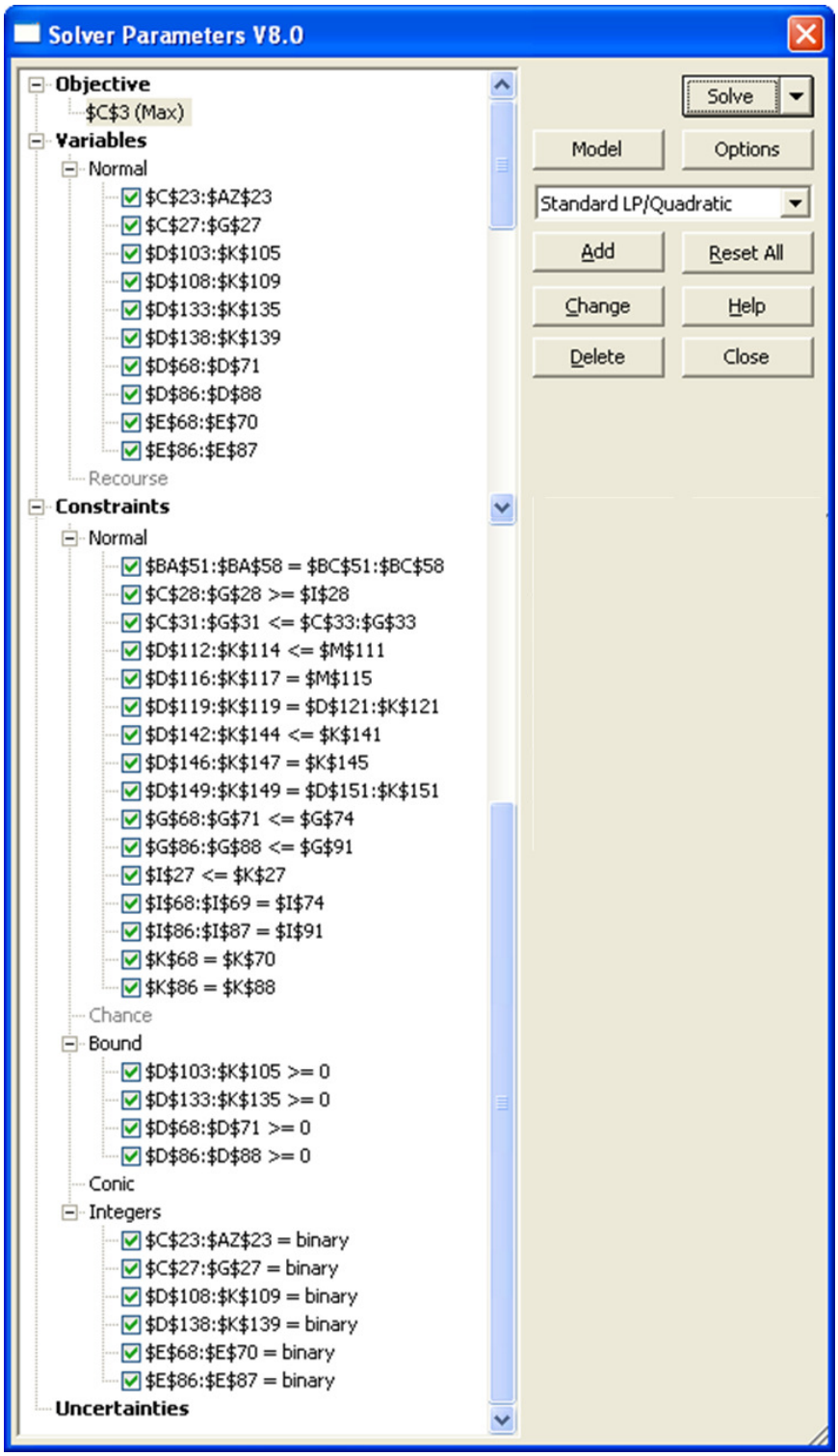
Prazo de Entrega em dias

	F1	F2	F3	F4	F5
I1	55	25	57	75	25
I2	67	53	68	32	57
I3	63	79	89	76	89
I4	41	52	42	29	59
I5	34	69	72	83	57
I6	81	76	77	45	40
I7	61	54	29	75	88
I8	59	68	31	56	86

54	prazo de entrega médio
89	prazo de entrega crítico

Tela da modelagem no *MS-Excel* para a otimização multicriterial (imagem 4 de 4)

OTIMIZAÇÃO MULTICRITERIAL COMBINATÓRIA



Parâmetros configurados no *Premium Solver* para a otimização multicriterial combinatória

CASO 3 OTIMIZAÇÃO MULTI-CRITÉRIOS COM COMBINATÓRIO

FO 87.98

Ponderação dos critérios (k)

	Custo	*Emissão*	*T desenv.*	*Lead time*
Pesos	0.377	0.283	0.226	0.113
Valores	91.64	89.13	90.00	68.84

PRIORIZAÇÃO DOS PESOS ENTRE OS CRITÉRIOS

	Custo	*Emissão*	*T desenv.*	*Lead time*
	100	*75*	*60*	*30*
100				
0				

Escolha dos pacotes

	F1P1	F1P2	F1P3	F1P4	F1P5	F1P6	F1P7	F1P8	F1P9	F1P10	F2P1	F2P2	…	F5P4	F5P5	F5P6	F5P7	F5P8	F5P9	F5P10
Xpj	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**1**	**0**	…	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**

Número de fornecedores

	F1	F2	F3	F4	F5		*Número de fornecedores escolhidos*		
Yj	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**		**5**	<=	5
	299	99	199	99	99	>=	0		

Contagem de fornecedores

soma Xij	3	1	2	1	1
	<=	<=	<=	<=	<=
M*Yj	100	100	100	100	100

Pacotes/itens escolhidos por fornecedor (Xij)

	F1P1	F1P2	F1P3	F1P4	F1P5	F1P6	F1P7	F1P8	F1P9	F1P10	F2P1	F2P2	…	F5P4	F5P5	F5P6	F5P7	F5P8	F5P9	F5P10	
I1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		0	0	0	0	0	0	0	
I2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	
I3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	
I4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		0	0	0	0	0	0	0	
I5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		0	0	0	0	0	0	0	
I6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		0	0	0	0	0	0	0	
I7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	
I8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	
Total itens	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	…	0	0	0	0	0	0	0	**8**
Total itens/pacote	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0		0	0	0	0	0	0	0	**3**
Total pacotes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		0	0	0	0	0	0	0	**1**

Formação dos pacotes (item pertence ou não ao pacote)

	F1P1	F1P2	F1P3	F1P4	F1P5	F1P6	F1P7	F1P8	F1P9	F1P10	F2P1	F2P2	…	F5P4	F5P5	F5P6	F5P7	F5P8	F5P9	F5P10			
I1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0		0	0	0	0	0	1	0	1	=	1
I2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		0	0	0	0	0	1	0	1	=	1
I3	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0		0	0	0	0	0	1	0	1	=	1
I4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0		1	0	0	0	0	0	1	1	=	1
I5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0		0	1	0	0	0	0	0	1	=	1
I6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0		0	0	1	0	0	0	1	1	=	1
I7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		0	0	0	1	0	0	1	1	=	1
I8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	…	0	0	0	0	1	1	0	1	=	1

Tela da modelagem no *MS-Excel* para a otimização multicriterial combinatória (imagem 1 de 4)

CUSTO TOTAL

Valor 91.64

f(x)	c	zc	ac	*Piecewise constraints*	*Proporcionalidade*	*Adequação à FO*	
0	5,770	0	0	0	1	4,959.5	
60	5,400	0	0	0	1	=	
90	5,000	1	1	0		**4,959.5**	120.0
100	4,753	0		-1			
Intervalc	1017.0					(custo total de contratação)	
Delta	101.7			<=	=		
				0	1		

Custos de contratação dos itens e pacotes, em mR$/ano

	F1P1	F1P2	F1P3	F1P4	F1P5	F1P6	F1P7	F1P8	F1P9	F1P10	F2P1	F2P2	...	F5P4	F5P5	F5P6	F5P7	F5P8	F5P9	F5P10
Cp	312.2	1,127.4	174.0	1,075.6	666.7	595.6	825.9	245.8	461.9	2,104.1	313.8	1,322.7	...	1,006.5	716.4	560.2	1,029.3	264.0	1,754.7	2,206.6

EMISSÕES DE GEE

Valores 89.13

f(x)	e	ze	ae	*Piecewise constraints*	*Proporcionalidade*	*Adequação à FO*	
0	4,679	0	0	0	1	2,880.4	
50	3,670	0	1	-1	1	=	
100	2,661	1		0		**2,880.4**	113.3
Intervalc	2018.0						
Delta	201.8			<=	=	(total de emissões)	
				0	1		

Emissão de GEE dos itens e pacotes, em t/ano

	F1P1	F1P2	F1P3	F1P4	F1P5	F1P6	F1P7	F1P8	F1P9	F1P10	F2P1	F2P2	...	F5P4	F5P5	F5P6	F5P7	F5P8	F5P9	F5P10
Ep	260.6	712.4	274.1	495.5	732.3	302.3	604.0	144.4	507.9	1,453.6	143.0	752.4	...	951.2	948.4	427.8	503.4	224.9	1,115.6	1,788.3

Tela da modelagem no *MS-Excel* para a otimização multicriterial combinatória (imagem 2 de 4)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
97														
98		**PRAZO DE DESENVOLVIMENTO**												
99														
100			*Valores*	90.67	96.33	90.00	91.33	91.33	91.33	91.67	99.33			
101														
102		f(x)	t	zt1	zt2	zt3	zt4	zt5	zt6	zt7	zt8			
103		0	247	0	0	0	0	0	0	0	0			
104		90	212	1	0	1	1	1	1	1	0			
105		100	182	0	1	0	0	0	0	0	1			
106		Intervalc	65.0											
107		Delta	6.5	at1	at2	at3	at4	at5	at6	at7	at8			
108				0	0	0	0	0	0	0	0			
109				1	1	1	1	1	1	1	1			
110														
111				*Piecewise constraints*								<=	0	
112				0	0	0	0	0	0	0	0			
113				0	-1	0	0	0	0	0	-1			
114				-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	0			
115				*Proporcionalidade*								=	1	
116				1	1	1	1	1	1	1	1			
117				1	1	1	1	1	1	1	1			
118				*Adequação à FO*										
119				210	193	212	208	208	208	207	184			
120				=	=	=	=	=	=	=	=			
121				210	193	212	208	208	208	207	184		**212**	prazo tot
122														
123		*Prazo de desenvolvimento dos itens e pacotes, em dias*												
124			F1P1	F1P2	F1P3	F1P4	F1P5	F1P6	F1P7	F1P8	F1P9	F1P10	F2P1	F2P2
125		Tp	218.0	186.0	214.0	185.0	208.0	185.0	219.0	232.0	218.0	208.0	210.0	188.0
126														

…

	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ
124	F5P4	F5P5	F5P6	F5P7	F5P8	F5P9	F5P10
125	196.0	225.0	193.0	207.0	239.0	239.0	207.0

Tela da modelagem no *MS-Excel* para a otimização multicriterial combinatória (imagem 3 de 4)

PRAZO DE ENTREGA

	Valores	100.00	72.00	0.00	83.25	83.25	83.25	31.50	97.50
f(x)	I	zl1	zl2	zl3	zl4	zl5	zl6	zl7	zl8
0	89	0	0.2	1	0.075	0.075	0.075	0.65	0
90	49	0	1	0	1	1	1	0	0
100	25	1	0	0	0	0	0	0	1
Intervalo	64.0								
Delta	6.4	al1	al2	al3	al4	al5	al6	al7	al8
		0	1	1	1	1	1	1	0
		1	0	0	0	0	0	0	1
		Piecewise constraints						<=	0
		0	-0.8	0	-0.925	-0.925	-0.925	-0.35	0
		-1	0	-1	0	0	0	-1	-1
		0	0	0	0	0	0	0	0
		Proporcionalidade						=	1
		1	1	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	1	1	1	1
		Adequação à FO							
		25	57	89	52	52	52	75	31
		=	=	=	=	=	=	=	=
		25	57	89	52	52	52	75	31

54	prazo de
89	prazo de

Prazo de entrega dos itens e pacotes, em dias

	F1P1	F1P2	F1P3	F1P4	F1P5	F1P6	F1P7	F1P8	F1P9	F1P10	F2P1	F2P2	...	F5P4	F5P5	F5P6	F5P7	F5P8	F5P9	F5P10
Tp	55.0	67.0	63.0	41.0	34.0	81.0	61.0	59.0	59.0	52.0	25.0	53.0	...	59.0	57.0	40.0	88.0	86.0	64.3	62.3

Tela da modelagem no *MS-Excel* para a otimização multicriterial combinatória (imagem 4 de 4)