

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - PPGEPS

DIEGO ARMANDO SOTO DE LA VEGA

**UMA ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO MULTICRITÉRIO PARA O PROBLEMA
INTEGRADO DE DISTRIBUIÇÃO E ESTOQUE: CASO EM UMA EMPRESA DE
TELECOMUNICAÇÕES**

Sorocaba
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - PPGEPS

DIEGO ARMANDO SOTO DE LA VEGA

**UMA ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO MULTICRITÉRIO PARA O PROBLEMA
INTEGRADO DE DISTRIBUIÇÃO E ESTOQUE: CASO EM UMA EMPRESA DE
TELECOMUNICAÇÕES**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos - *Campus* Sorocaba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. José Geraldo Vidal Vieira

Co-orientadora: Profa. Dra. Eli Angela Vitor Toso

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Sorocaba
2014

Soto de La Vega, Diego Armando.
S718a Uma abordagem de otimização multicritério para o problema integrado de distribuição e estoque: caso em uma empresa de telecomunicações. / Diego Armando Soto de La Vega. -- 2014.
174 f. : 28 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos,
Campus Sorocaba, Sorocaba, 2014
Orientador: José Geraldo Vidal Viera
Banca examinadora: Débora Pretti Ronconi, João Eduardo Azevedo
Ramos da Silva
Bibliografia

1. Logística empresarial – controle de estoque. 2. Distribuição de mercadorias. 3. Controle de mercadoria. I. Título. II. Sorocaba-
Universidade Federal de São Carlos.

CDD 658.5

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do *Campus* de Sorocaba.

DIEGO ARMANDO SOTO DE LA VEGA

**"UMA ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO MULTICRITÉRIO
PARA O PROBLEMA INTEGRADO DE DISTRIBUIÇÃO E
ESTOQUE: CASO EM UMA EMPRESA DE
TELECOMUNICAÇÕES"**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
do Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos
para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção, Área de Concentração:**

Gestão de Operações.

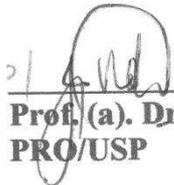
Sorocaba, 1 de outubro de 2014

Orientador (a):

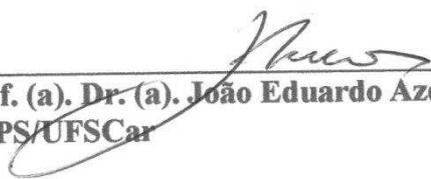


**Prof. (a). Dr. (a). José Geraldo Vidal Vieira
DEPS/UFSCar**

Examinadores (as):



**Prof. (a). Dr. (a). Débora Pretti Ronconi
PRO/USP**



**Prof. (a). Dr. (a). João Eduardo Azevedo Ramos da Silva
DEPS/UFSCar**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, quem desenhou os parâmetros de nossa existência, e modela as variáveis de nossas vidas, o criador do complexo sistema de critérios que determina nossas escolhas.

A minha família, especialmente aos meus pais, Manuel e Levys, meus maiores exemplos de superação e entrega. Obrigado pelo apoio e amor nesta etapa longe de casa.

Ao meu orientado Prof. José Geraldo por seu compromisso, dedicação e pelo conhecimento compartilhado. Toda minha gratidão por essas e muitas coisas mais.

À minha co-orientadora Profa. Eli pela grande ajuda e envolvimento no projeto. Toda minha admiração.

À Rosane e a Maria Luisa pelo recebimento e confiança desde a minha chegada ao Brasil, pessoas maravilhosas sempre dispostas a ajudar.

À Mafe por me permitir compartilhar as nossas vidas e pela força e motivação. Tu presencia fue mi aliento.

A Prof. Jota Mario, o meu orientador de graduação, quem despertou o meu interesse pela otimização.

Às amigas que se forjaram durante o mestrado e que espero de coração, continuem fazendo parte importante da minha vida, Karim, Nadya, Alfredo, Pedro, Renata, Maritha, Brena e Alê.

Aos meus amigos da Republica, Eduardo, Bruno e Wesley, pela ótima convivência e conselhos. Pela paixão compartilhada à ciência e ao futebol.

À CAPES, pela bolsa concedida.

A Antonio, Luan e Natalia, pessoal da empresa do estudo de caso, pela colaboração durante a realização deste trabalho.

À Érica pela competência, disposição e simpatia e a todo o corpo docente do Programa em Engenharia de Produção do campus Sorocaba. Especialmente ao Prof. João Eduardo que gentilmente participou da minha banca e criteriosamente aporou seus julgamentos.

"Que es la vida? Un frenesí, una ilusión, una sombra, una ficción; y el mayor bien es pequeño; que toda la vida es sueño, y los sueños, sueños son"

Pedro Calderón de la Barca

RESUMO

DE LA VEGA, Diego A. S. *Uma abordagem de otimização multicritério para o problema integrado de distribuição e estoque: Caso em uma empresa de telecomunicações*. 2014. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Centro de Ciências em gestão e Tecnologias, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba.

Este trabalho apresenta uma abordagem multi-metodológica de otimização e análise multicritério para tratar o problema integrado de distribuição e estoque considerando múltiplos modos de transporte de carga. O sistema analisado fundamenta-se na rede de distribuição de uma empresa no setor de telecomunicações, cujas operações são típicas do setor. A rede de distribuição é composta por um conjunto de centros de distribuição que atendem as demandas de centros de distribuição regionais sobre um horizonte de planejamento de médio prazo. No transporte da mercadoria, os modos de transporte de carga completa (*Full truckload -FTL*) e fracionada (*Less Than Truckload -LTL*) foram considerados. Para uma carga completa, um valor fixo é constituído em função da capacidade do veículo utilizado, enquanto que para a carga fracionada, o custo é baseado na quantidade embarcada e na distância percorrida. As decisões do planejamento da distribuição neste problema envolvem definir as quantidades e datas de envio desde cada origem para cada destino indicando o modo de transporte de carga utilizado, para carga completa deve se definir ainda o tipo de veículo, considerando uma frota heterogênea em custo e capacidade. Os estoques de segurança em cada centro de distribuição regional também devem ser determinados em função da variabilidade da demanda e dos tempos de atendimento, bem como o nível de serviço desejado. Estas decisões devem ser definidas de modo a minimizar os custos associados a transporte e estoque, e levando em conta critérios relevantes para o problema de difícil quantificação tais como: facilidade de rastreamento, histórico de desempenho, segurança da carga, disposição para negociar os fretes, serviços de documentação e faturamento, entre outros. Uma formulação matemática específica foi utilizada para geração de soluções e uma estrutura decisória construída através dos métodos SMART (*Simple Multi-Attribute Ranking Technique*) e AHP (*Analytic Hierarchy Process*) permitiu avaliar estas alternativas. Um caso real foi abordado em uma empresa brasileira para testar a eficiência da abordagem em situações reais. Como resultado, a abordagem proposta permitiu analisar com robustez a decisão mais adequada segundo as preferências e aversão ao risco inerentes dos decisores da empresa. Neste sentido, conclui-se que a preferência dos decisores, direcionou a metodologia na proposição de um planejamento focado principalmente na eficiência, a rápida entrega e na confiabilidade dos tempos de atendimento.

Palavras-chave: Cadeia de suprimento. Problema de distribuição. Gestão de estoques. Programação inteira. Tomada de Decisão Multicritério.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Metodologia de pesquisa. Fonte: Elaborado pelo autor.....	17
Figura 2.1- Estrutura de descontos sobre todas as unidades. Fonte: Autoria.....	26
Figura 2.2 - Estrutura de descontos incrementais. Fonte: Autoria.....	26
Figura 3.1 - Descrição da rede de distribuição.....	34
Figura 3.2- Estrutura de custos para carregamento FTL.....	35
Figura 3.3 - Estrutura de custos no carregamento LTL.....	36
Figura 3.4 - Tipos de estoque considerados no problema.....	40
Figura 3.5 - Restrição capacidade de armazenagens dos clientes.....	42
Figura 3.6 - Custos associados: Instância real.....	46
Figura 3.7 - Distribuição da carga: Instância real.....	47
Figura 3.8 - Variação do nível de serviço desejado.....	53
Figura 3.9 - Variação do desvio padrão do Lead Time fracionado.....	53
Figura 3.10 - Variação do desconto no frete dedicado.....	54
Figura 3.11 - Nível de estoque em função das restrições de veículos dedicados.....	54
Figura 3.12 - Nível de estoque em função da variação da demanda.....	54
Figura 3.13 - Custos associados ao estoque e transporte nos cenários analisados.....	58
Figura 4.1 - A base de decisão. Fonte: Varian (2006).....	60
Figura 4.2 - Estrutura de uma loteria. Fonte: Adaptado de Russell e Norvig (2003).....	62
Figura 4.3 - Árvore para o problema de localização de escritório. Fonte: Goodwin e Wright (2005).....	66
Figura 4.4 - Classificação dos métodos usados na abordagem proposta.....	74
Figura 5.1 - Estrutura da metodologia. Fonte: Montibeller, G.; Franco (2007).....	83
Figura 5.2 - Integração entre o modelo matemático e o modelo multicritério de decisão.....	91
Figura 6.1 - Função de utilidade: Custo de transporte.....	99
Figura 6.2 - Função de utilidade: Vel. do transporte.....	99
Figura 6.3 - Função de utilidade do critério: Baixo erro de entrega.....	101
Figura 6.4 - Função de utilidade do critério: Serviço de coleta confiável.....	102
Figura 6.5 - Função de utilidade do critério: Frequência do serviço.....	102
Figura 6.6 - Função de utilidade do critério: Cap. de prestar serviços que não danificam bens.....	102
Figura 6.7 - Função de utilidade do critério: Taxas flexíveis.....	102
Figura 6.8 - Função de utilidade do critério: Histórico de desempenho.....	103
Figura 6.9 - Função de utilidade do critério: Resposta rápida em situações de emergência.....	103
Figura 6.10- Função de utilidade do critério: Mudanças.....	104
Figura 6.11 - Função de utilidade do critério: Documentação e faturamento.....	104
Figura 6.12 - Função de utilidade do critério: Comunicação.....	105
Figura 6.13 - Função de utilidade do critério: Cooperação.....	105
Figura 6.14 - Função de utilidade do critério: Qualidade do pessoal de transporte.....	106
Figura 6.15 - Função de utilidade do critério: Rastreamento da carga.....	106
Figura 6.16 - Função de utilidade do critério: Tecnologia de informação.....	107
Figura 6.17 - Função de utilidade do critério: Programações flexíveis.....	107
Figura 6.18 - Função de utilidade do critério: Limitações de capacidade.....	107
Figura 6.19 - Função de utilidade do critério: Operações de carga e descarga.....	107
Figura 6.20 - Função de utilidade do critério: Compatibilidade estratégica.....	108
Figura 6.21 - Função de utilidade do critério: Relacionamento ao longo prazo.....	108
Figura 6.22 - Função de utilidade do critério: Cobertura e acesso.....	109
Figura 6.23 - Árvore de decisão para o caso e ponderação dos critérios.....	113
Figura 6.24 - Utilidade para o critério "documentação" da solução (4).....	118
Figura 6.25 - Avaliação geral das alternativas.....	121
Figura 6.26 - Aproximação à fronteira eficiente de Pareto para Custo e Benefício.....	123
Figura 6.27 - Análises de sensibilidade: Variação da preferência do Benefício.....	124
Figura B.0.1 - Função de utilidade para retorno financeiro.....	147

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 - Elementos de custo de frota. Fonte: Min (1998)</i>	21
<i>Tabela 3.1 - Alocação de clientes aos CD: Instância real</i>	47
<i>Tabela 3.2 - Planejamento da distribuição e política de estoque para o cliente 61: Instância real</i>	48
<i>Tabela 3.3 – Síntese dos experimentos computacionais: Tempo limite 3600 seg.</i>	51
<i>Tabela 3.4 – Sínteses dos experimentos computacionais: gap 5%.</i>	52
<i>Tabela 3.5 – Resultados das combinações na função objetivo</i>	56
<i>Tabela 4.1 - Atribuição de pesos com SMART</i>	69
<i>Tabela 4.2 - Atribuição de pesos com Swing Weighting</i>	69
<i>Tabela 4.3 - Pesos ROC de acordo com o número de atributos. Fonte: Edwards e Barron (1994)</i>	70
<i>Tabela 4.4 - Escala fundamental de Saaty. Fonte: Saaty (1980)</i>	71
<i>Tabela 5.1 - Resumo de critérios apontados na literatura</i>	82
<i>Tabela 5.2 - Abordagens de solução para problemas com múltiplos critérios</i>	86
<i>Tabela 5.3 - Resumo da metodologia proposta</i>	92
<i>Tabela 6.1 - perfis dos entrevistados</i>	95
<i>Tabela 6.2 - Avaliação da relevância dos critérios ou objetivos fundamentais</i>	96
<i>Tabela 6.3 - Árvore de decisão para o Caso de estudo</i>	97
<i>Tabela 6.4 - Indicadores definidos para os critérios em análise</i>	98
<i>Tabela 6.5 - Utilidade para os custos de transporte</i>	99
<i>Tabela 6.6 - Utilidade para o lead time da rede</i>	99
<i>Tabela 6.7 - Escalas qualitativas utilizadas no caso exemplo</i>	100
<i>Tabela 6.8 - Pesos relativos e finais para os critérios, Julgamentos individuais</i>	110
<i>Tabela 6.9 - Valores metas das funções objetivo</i>	115
<i>Tabela 6.10 - Soluções não dominadas geradas em função dos pesos ω</i>	116
<i>Tabela 6.11 - Porcentagens de carregamentos FTL e LTL utilizado nas soluções analisadas</i>	117
<i>Tabela 6.12 - Valores das alternativas em relação aos critérios relevantes- parte I</i>	119
<i>Tabela 6.13 - Valores das alternativas em relação aos critérios relevantes- parte II</i>	120
<i>Tabela 6.14 - Utilidade para custo e benefício das alternativas</i>	122
<i>Tabela 6.15 - Comparação entre diferentes métodos de ponderação de critérios</i>	125
<i>Tabela 6.16 - Resumo das análises de sensibilidade</i>	126
<i>Tabela B.1 - Exemplo: Retornos financeiros</i>	146
<i>Tabela B.2 - Exemplo: Retornos financeiro</i>	147

LISTA DE SIGLAS

3PL	<i>Third party Logistic</i> – Operador Logístico
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> – Processo de análise hierárquico
ANP	<i>Analytic Network Process</i> – Processo Analítico de Rede
ATCH	<i>Approximate transportation costs heuristic</i> – Heurística De Custos De Transporte Aproximado
CD	<i>Distribution Center</i> – Centro de Distribuição
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i> – Análise por envoltória de dados
DP	<i>Distribution Problem</i> – Problema de Distribuição
DRAI	<i>Dinamic Rounting and Inventory</i> – Problema de Roteamento e Inventário Dinâmico
EOQ	<i>Economic Order Quantity</i> – Quantidade econômica de pedido
FTL	<i>Full Truckload</i> – Carga completa, carga dedicada, carga lotação.
GAMS	<i>Generic Algebraic Modeling System</i> – Sistema de Modelagem Algébrica
IIDP	<i>Integrated Inventory Distribution Problem</i> – Problema Integrado de Distribuição e Estoque
JTIP	<i>Joint Transportation and Inventory Problem</i> – Problema Conjunto de Transporte e Inventário
LTL	<i>Less Than Truckload</i> – Carga fracionada, menos que um caminhão.
MAUT	<i>Multiple Attribute Utility Theory</i> – Teoria da Utilidade Multi-Atributos
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i> – Tomada de Decisão Multicritério
MDDP	<i>Multi-Depot Distribution Problem</i> – Problema de Distribuição com múltiplos depósitos
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i> – Programação linear inteira mista
MODM	<i>Multiple-Objective Decision Making</i> – Tomada de Decisão Multiobjetivo
MOP	<i>Multiple-Objective Programming</i> – Programação Multiobjetivo
MPIIDP	<i>Multi-period Inventory/Distribution Planning Problem</i> – Problema de Inventário e Distribuição Multiperíodo
NLP	<i>Nolinear Programming</i>
ROC	<i>Rank Order Centroid</i>
SMART	<i>Simple Multi-Attribute Ranking Technique</i> – Tecnica Simples de Ranking Multiatributo
SMARTER	<i>Simple Multi-Attribute Ranking Technique Exploiting Ranks</i>
SMARTS	<i>Simple Multi-Attribute Ranking Technique Exploiting Ranks using Swings</i>
SS	<i>Safety Stock</i> – Estoque de Segurança
UME	Utilidade Média Esperada
UPS	United Parcel Services
V.I.S.A.	<i>Visual Interactive Sensitivity Analysis</i>
VMI	<i>Vendor Managed Inventory</i> – Gerenciamento dos Estoques pelo Fornecedor
VRP	<i>Vehicle Routing Problem</i> - Problema de Roteamento de Veículo
VRPPC	<i>Vehicle routing problem with private fleet and common carrier</i> -

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	16
1.3 ESCOPO E LIMITAÇÕES	16
1.4 METODOLOGIA DE PESQUISA.....	17
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
2. REVISÃO DE PROBLEMAS DE DISTRIBUIÇÃO E ESTOQUE	20
2.1 PROBLEMAS DE ROTEAMENTO COM FROTA PRIVADA E CARREGADOR COMUM	20
2.2 PROBLEMAS DE DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE LOTES COM MÚLTIPLOS MODOS DE REABASTECIMENTO	23
2.3 PROBLEMAS INTEGRADOS DE TRANSPORTE E ESTOQUE.....	27
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	30
3. MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA	33
3.1 CONSIDERAÇÕES PARA MODELAGEM.....	33
3.2 MODELO MATEMÁTICO INTEGRADO DE DISTRIBUIÇÃO E ESTOQUE	37
3.3 ESTUDOS COMPUTACIONAIS.....	44
3.3.1 <i>Análises da instância real</i>	45
3.3.2 <i>Análises das variações nos parâmetros</i>	49
3.3.3 <i>Análises da função objetivo</i>	55
4. ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO.....	59
4.1 INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE DECISÃO	59
4.1.1 <i>Elementos da decisão</i>	60
4.2 TEORIA DA UTILIDADE.....	61
4.2.1 <i>Utilidade Multiatributo</i>	63
4.3 TÉCNICAS DE COMPARAÇÃO DE ALTERNATIVA SOBRE VÁRIOS ATRIBUTOS	64
4.3.1 <i>Técnica simples de avaliação multiatributo (SMART)</i>	65
4.3.2 <i>Método de ponderação de critérios</i>	68
4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS UTILIZADOS	72
5. ABORDAGEM PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO MULTICRITÉRIO.....	75
5.1 CRITÉRIOS RELEVANTES NA ESCOLHA DE TRANSPORTADORES	75
5.2 PROPOSTA METODOLÓGICA	83
5.2.1 <i>Justificativa para o uso da abordagem multicritério proposta</i>	83
5.2.2 <i>Passos para a implementação da abordagem metodológica</i>	87
6. AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA: O CASO DE UMA EMPRESA DE TELECOMUNICAÇÕES	93
6.1 IMPLEMENTAÇÃO: ENTENDIMENTO DO PROBLEMA E CLASSIFICAÇÃO	93

6.2	IMPLEMENTAÇÃO: DETERMINAÇÃO DOS OBJETIVOS FUNDAMENTAIS.....	95
6.3	IMPLEMENTAÇÃO: PREFERÊNCIA E COMPENSAÇÃO DE VALORES	98
6.4	IMPLEMENTAÇÃO: HIERARQUIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS	109
6.5	IMPLEMENTAÇÃO: DETERMINAÇÃO DAS ALTERNATIVAS.....	114
6.6	IMPLEMENTAÇÃO: AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS.....	121
6.7	IMPLEMENTAÇÃO: ANÁLISES DE SENSIBILIDADE.....	124
6.7.1	<i>Variação na ponderação dos critérios.....</i>	<i>124</i>
6.7.2	<i>Técnica Rank Order Centroid (ROC) para ponderação dos critérios.....</i>	<i>125</i>
6.7.3	<i>Estratégia de agrupamento com julgamentos ponderados.....</i>	<i>126</i>
6.7.4	<i>Decisores com neutralidade ao risco.....</i>	<i>127</i>
6.8	RECOMENDAÇÃO DE CURSO DE AÇÃO	128
7.	CONCLUSÕES.....	129
7.1	SOBRE O OBJETIVO DA PESQUISA	129
7.2	IMPLICAÇÕES TEÓRICAS E CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA	131
7.3	IMPLICAÇÕES GERENCIAIS.....	131
7.4	LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	132
7.5	LIMITAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES DA ABORDAGEM PROPOSTA.....	132
7.6	PERSPECTIVAS PARA FUTURAS PESQUISAS	134
	REFERÊNCIAS.....	135
	APÊNDICES	144
	A - AXIOMAS DA TEORIA DA UTILIDADE	144
	B - LEVANTAMENTO DE CURVAS DE UTILIDADE: MÉTODO DE CERTEZA EQUIVALENTE	146
	C - PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICO: ETAPAS.....	148
	D - DEFINIÇÕES DOS CRITÉRIOS	150
	E - ROTEIRO DA ENTREVISTA	152
	ANEXOS.....	154
	A - INFORMAÇÕES DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO REAL UTILIZADAS NOS ESTUDOS COMPUTACIONAIS	154
	B - CURVAS DE UTILIDADE PARA CRITÉRIOS QUANTITATIVOS E AS FUNÇÕES	166
	C - JULGAMENTOS INDIVIDUAIS DOS TOMADORES DE DECISÕES.....	167
	D - COMPARAÇÃO DOS JULGAMENTOS AGRUPADOS ATRAVÉS DO MÉTODO AHP-AIJ.....	172

1. INTRODUÇÃO

1.1 Problema e Justificativa

Tradicionalmente, as políticas de transporte e estoque em sistemas de distribuição têm sido definidas separadamente. Deste modo, os planejamentos individuais podem não ser suficientes para otimizar o desempenho da cadeia de suprimentos. De fato, a redução de custos de transporte e de estoque em separado, pode não ser eficaz para reduzir o custo total logístico devido à relação de conflito entre transporte e inventário (LI; SU; LI, 2010). Na atualidade, a ideia mais importante na gestão da cadeia de suprimentos é a tomada de decisões globais em vez de tomada de decisões de forma sequencial (LIU e YE, 2009).

Desde o início da década de 1980, a otimização das políticas integradas de transporte e estoque tem sido implementada com sucesso em muitas indústrias (LIU e YE, 2009). Como consequência, atualmente há muitos trabalhos na literatura sobre estes problemas integrados e uma gama de modelos matemáticos e abordagens de solução têm sido propostos (GHAREGOZLOO HAMEDANI; JABALAMELI; AMIRI, 2013; JHA et al., 2011; SADJADY; DAVOUDPOUR, 2012; TANCREZ; LANGE; SEMAL, 2012).

A integração das decisões de transporte e estoque é particularmente importante porque a configuração do sistema de distribuição afeta não só os custos do fornecimento do distribuidor, mas também o custo de estoque e qualidade de serviço ao cliente (HANCZAR, 2011). Fatores como os custos crescentes de petróleo, o congestionamento rodoviário, as dificuldades de acesso, a regulamentação rodoviária, entre outros, tem feito com que as empresas busquem melhorar a sua gestão do transporte. Por outro lado, a necessidade de aumentar a capacidade de resposta da cadeia de abastecimento e alcançar níveis desejados de satisfação ao cliente sem diminuir a sua eficiência do sistema, tem motivado as empresas a se preocupar pela gestão dos estoques (DESHPANDE; SHUKLA; TIWARI, 2011).

Segundo Hanczar (2011), o problema integrado de transporte e estoque refere-se à distribuição de um produto a partir de uma ou múltiplas origens para os clientes ao longo de um horizonte de planejamento definido. Cada cliente tem uma capacidade máxima de armazenamento e demanda uma quantidade periódica conhecida do produto. O objetivo do problema envolve encontrar um plano de entrega para minimizar o custo total de transporte e de estoque ao longo do horizonte de planejamento, sob o pressuposto de que nenhum cliente admite falta de estoque. O plano de entrega consiste em definir as quantidades e datas de

envio, bem como as vias de entrega para cada cliente em cada período. Uma solução deste tipo é conhecida como uma política de reposição e de distribuição de inventário.

Nestes problemas, o fornecedor pode operar uma frota própria de veículos com uma capacidade limitada, usada para entregar os suprimentos. No entanto, o uso de frota própria não é usual, especialmente em empresas focadas nas suas operações primárias. Segundo Fleury (2002), existe no Brasil uma forte tendência à terceirização da distribuição, com poucos investimentos em frota própria. Cerca de 80% das 500 maiores empresas privadas no Brasil não possuem frota própria, e cerca de 90% das empresas que possuem, também utilizam frota de terceiros para complementar sua capacidade de transporte. Esta tendência é fortemente influenciada pelos baixos preços cobrados pelas empresas transportadoras, o que torna baixa a atratividade de investimentos em frota própria.

No transporte rodoviário terceirizado de mercadorias (operadores logísticos-3PL ou transportadores autônomos), dois modos típicos de transporte de carga costumam estar disponíveis: o modo de transporte de carga completa ou dedicada (*Full truckload -FTL*) e o modo de transporte de carga fracionada (*Less Than Truckload -LTL*). Para uma carga FTL, um valor fixo é constituído em função da capacidade do veículo alugado e distancia, enquanto que para a carga LTL, o custo é baseado na quantidade embarcada (peso e volume) e distância percorrida (RIEKSTS; VENTURA, 2010). No caso de pequenas quantidades, o uso de carga completa pode ser mais caro do que usar carga fracionada. Em contrapartida, o transporte FTL fornece tempos de atendimento menores, bem como menor variabilidade, pois o transporte atende diretamente origem e destino sem paradas adicionais para consolidação. No transporte fracionado, as empresas prestadoras do serviço de transporte costumam utilizar centros de consolidação e de transbordo para agrupar pequenas cargas com objetivo de minimizar os custos do transporte.

Atividades de transporte impactam as políticas de controle de estoque, pois uma frequência de atendimento maior implica em menor quantidade de estoque regular. Do mesmo modo, uma menor variabilidade do tempo de atendimento provoca menores estoques de segurança. Desta forma, selecionar o modo adequado de transporte de carga traz economias significativas de custos para as empresas, sendo esta decisão uma das mais importantes na logística de redes de distribuição (CHU, 2005; MEIXELL; NORBIS, 2008). Isto é compreensível, dado que o transporte e o estoque geralmente correspondem a um terço e um quinto dos custos logísticos das empresas, respectivamente (ABDELMAUID, 2004).

Gerentes de logística consideram vários critérios para tomar as decisões relacionadas ao transporte, muitas vezes com foco em custo ou tempo de trânsito. Mas a decisão não é simples, pois geralmente envolve vários critérios conflitantes, sendo que alguns não são facilmente quantificáveis (MEIXELL; NORBIS, 2008). Segundo Anaya (2009), além das características de custo, a qualidade do serviço de transporte geralmente é definida em função das exigências do mercado, englobando uma série de conceitos relacionados com aspectos como rapidez e pontualidade de entrega, segurança e higiene, cumprimentos dos condicionantes impostos pelo cliente, informação e controle do transporte, entre outros. Desta forma, a função do transporte é considerar todos esses fatores de forma conjunta, sendo que uma adequada ponderação da importância desses fatores permitirá escolher o modo de transporte mais adequado para satisfazer as necessidades do distribuidor e de seus clientes.

As abordagens tradicionais para distribuição na rede de suprimentos ainda apresentam deficiências ao considerar os critérios separadamente, sendo o custo geralmente o mais relevante nas análises. Segundo Ho e Emrouznejad (2009), os enfoques tradicionais de otimização geralmente falham em dois aspectos. Em primeiro lugar, eles são focados em um único critério e os objetivos são definidos em função deste único fator, geralmente minimizar o custo total ou tempo de entrega. Em segundo lugar, somente dados quantitativos são considerados nas técnicas de otimização e alguns fatores qualitativos, os quais são principalmente orientados ao cliente, são desconsiderados.

As abordagens de otimização multicritério, devido a sua capacidade para considerar vários aspectos relevantes na tomada de decisão, tem ganhado o interesse de pesquisadores nos últimos anos (CINTRON; RAVINDRAN; VENTURA, 2010; HO; EMROUZNEJAD, 2009; PARVEEN, 2012; WALLENIUS et al., 2008). Além disso, pesquisas recentes têm demonstrado o seu crescimento e aceitação para solução de problemas contemporâneos da logística (AGUEZZOUL, 2014).

Neste sentido, este trabalho apresenta uma abordagem para definir o planejamento da distribuição e as políticas de controle de estoque sobre uma rede de distribuição com múltiplos modos de transporte de carga baseado na otimização multicritério. A abordagem pode ser classificada como uma abordagem híbrida, pois considera o uso de modelos de programação matemática de forma integrada com análise de decisão multicritério (MCDM). O objetivo da abordagem é a proposição de um plano para minimizar os custos do sistema integrado de distribuição e estoque levando em conta um conjunto de fatores relevantes que o modelo matemático não considera.

O objeto de estudo refere-se ao problema de distribuição de mercadorias e definição de políticas de estoque considerando os modos de transporte de carga completa e fracionada como alternativas de transporte. O problema tratado nesta dissertação engloba uma rede de distribuição de uma única camada, incluindo um conjunto de CDs e um conjunto de armazéns ou CD regionais. Os custos relevantes para o problema são os custos relacionados ao transporte (por carga completa ou fracionada) e os custos relativos aos estoques (de manutenção de estoque regular, de segurança e em trânsito).

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem por objetivo principal propor uma abordagem para tratar o problema integrado de distribuição e estoque, considerando os modos de transporte de carga completa e fracionada, através de uma combinação de otimização, tipicamente quantitativa, com análises multicritério que permite a incorporação de critérios qualitativos.

Um objetivo específico refere-se à formulação de um modelo matemático para otimizar de forma integrada as políticas de distribuição (quantidades entregues a partir de cada CD com cada tipo de carga) e as políticas de estoque (frequência de envio e estoques de segurança em cada CD regional) levando em conta as características da rede e o nível de serviço estabelecido pela empresa embarcadora.

Outro objetivo específico é a identificação dos critérios mais relevantes utilizados na tomada de decisão para a seleção do modo de transporte de carga.

1.3 Escopo e limitações

As decisões de planejamento em uma rede de distribuição podem ser classificadas em três níveis de hierarquia: estratégico, tático e operacional. A localização de instalações, o desenho da rede de distribuição, a conformação de *clusters* de clientes (agrupamentos), entre outros problemas são considerados decisões de nível estratégico. As decisões que lidam com a gestão de estoque e transporte em um médio prazo, como a determinação dos níveis de estoque de segurança, a escolha dos modos de transporte utilizados, o dimensionamento da frota, a seleção de uma transportadora, entre outras, encontram-se dentro do nível tático. Finalmente, as decisões que tem lugar em um planejamento em curto prazo, como o roteamento de veículos, representam decisões de nível operacional (JHA et al., 2011).

Desta forma, esta pesquisa tem foco no problema de distribuição considerando múltiplos modos de transporte de carga (FTL e LTL), que se encaixa dentro do nível de gestão estratégico/tático. Estratégico no sentido que considera os objetivos fundamentais para

a configuração de entrega origem-destino e os níveis de estoque de segurança que devem ser mantidos em cada CD regional durante um planejamento de longo prazo (anual). Tático porque indica as quantidades que devem ser alocadas a cada modo de transporte de carga e os estoques que devem ser mantidos em cada CD regional durante períodos semanais. Decisões mais operacionais não são consideradas neste trabalho, por exemplo, não é indispensável conhecer o dia específico em que uma carga será enviada, nem a ordem de visita aos clientes, mas apenas é necessário determinar a semana em que este envio deve ocorrer.

1.4 Metodologia de pesquisa

Convém diferenciar entre a metodologia de pesquisa e a proposta de metodologia (abordagem híbrida de otimização multicritério) a qual é uma contribuição desta dissertação.

Considerando que este trabalho envolve a combinação de técnicas quantitativas e qualitativas, a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa segue a etapas apresentadas na Figura 1.1.

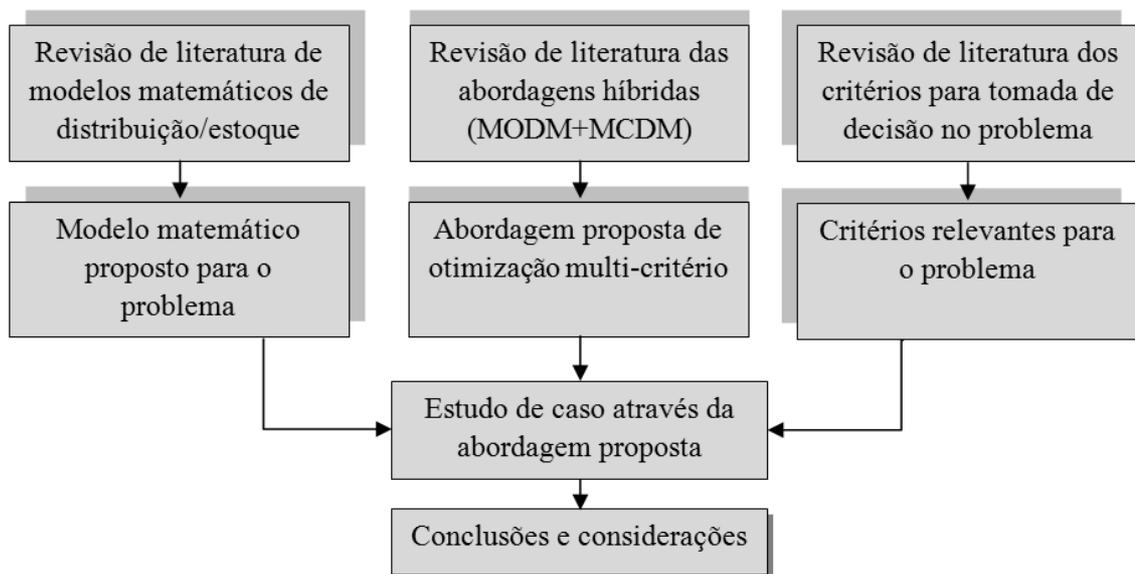


Figura 1.1 - Metodologia de pesquisa. Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 1.1 é possível destacar as fases mais importantes desta pesquisa, iniciando com revisões de literatura em três focos: sobre a abordagem utilizada, sobre os modelos matemáticos disponíveis e sobre os critérios que influenciam a tomada de decisão no problema definido.

A partir da revisão de literatura sobre combinação de técnicas de otimização para a Tomada de Decisão Multiobjetivo (*Multi-Criteria Decision Making* - MODM) com técnicas

de Tomada de Decisão Multicritério (*Multi-Criteria Decision Making* - MCDM), foi possível propor uma abordagem híbrida para apoio à tomada de decisões.

O sistema de distribuição de uma empresa com características típicas do seu setor (caso) motivou a proposição de um modelo matemático para o problema, fundamentado também nas características revisadas de modelos matemáticos da literatura. Por outro lado, critérios relevantes de caráter genérico (quantitativos e qualitativos) para a decisão de escolha dos modos de transporte de carga foram também obtidos a partir de uma revisão.

Por fim, para a validação da abordagem híbrida proposta de otimização e análises multicritério, um caso em uma empresa do setor telecomunicações foi abordado. O caso permitiu validar tanto o modelo matemático utilizado, considerando as características particulares da rede de distribuição da empresa, como os critérios relevantes para a tomada de decisão. A validação teve fundamentação no método de investigação de estudo de caso, que segundo Yin (2010), permite generalizar quanto às proposições teóricas e não quanto às populações, sendo precisamente este o sentido da sua utilização neste trabalho.

Na coleta de dados, o princípio de triangulação definido por Yin (2010) foi utilizado para acrescentar validade e rigor à pesquisa. Em primeiro lugar, dados numéricos, como tabelas de custo e histórico de demanda, foram obtidos através das bases de dados da empresa e do seu operador logístico. Em segundo lugar, entrevistas estruturadas e questionários também foram aplicados para a obtenção de informação com diferentes respondentes (pessoal administrativo da empresa carregadora e do operador logístico). Em terceiro lugar, a observação direta em um dos centros de distribuição foi também necessária para o melhor entendimento das operações da empresa.

Com relação à abordagem proposta, esta tem fundamento na estrutura metodológica de Montibeller e Franco (2007) que consiste no entendimento do problema, na definição de objetivos fundamentais, na determinação de prioridades entre objetivos, no desenvolvimento de um modelo matemático para geração de alternativas, na avaliação das alternativas e na análise de sensibilidade para recomendação de um curso de ação. Estas etapas serão apresentadas com mais detalhe no capítulo 5.

Para o desenvolvimento do modelo matemático e a sua respectiva validação, esta dissertação teve fundamento no método de pesquisa quantitativa empírica normativa de acordo com a tipologia proposta por Bertrand e Fransoo (2002). Sendo denominada empírica porque se preocupa em avaliar o uso e desempenho das soluções do problema obtidas pelo

modelo construído em processos operacionais da vida real. Por outro lado, é normativa porque tem fundamento sobre modelos que indicam uma decisão para o problema.

1.5 Organização do Trabalho

Esta dissertação está organizada em sete capítulos.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão de literatura dos modelos de distribuição e estoque considerando múltiplos modos de transporte de carga.

O capítulo 3 apresenta um melhor detalhamento do problema de distribuição abordado, bem como o modelo matemático proposto e alguns estudos computacionais realizados com dados reais e variação de parâmetros.

O capítulo 4 apresenta uma revisão conceitual sobre as técnicas de análise de decisão com múltiplos critérios e que são utilizadas neste trabalho. São apresentados os métodos de comparação de alternativas sobre múltiplos critérios: SMART e AHP.

No capítulo 5, a abordagem de otimização multicritério proposta para o problema em questão é apresentada. Inicialmente uma revisão de literatura é feita para identificar os critérios relevantes na tomada de decisões de escolha entre modos de transporte de carga rodoviários.

No capítulo 6, um caso sobre uma empresa do setor das telecomunicações é discutido para avaliar e demonstrar a abordagem proposta. Análises de sensibilidade foram feitas para verificar o desempenho da solução sugerida.

Finalmente, o capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas acerca dos objetivos de pesquisa, as implicações acadêmicas e gerenciais desde trabalho, as limitações e as perspectivas para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE PROBLEMAS DE DISTRIBUIÇÃO E ESTOQUE

Neste capítulo é apresentada uma revisão de literatura sobre modelos que incorporam as decisões de distribuição de mercadorias e controle de estoque na cadeia de suprimentos, focando modelos que buscam integrar decisões de transporte com decisões de estoque, mais especificamente trabalhos que consideram a existência de modos de transporte de carga completa (*Full Truckload* - FTL) e fracionada (*Less Than Truck Load* -LTL).

Não foram encontrados, na literatura revisada, modelos matemáticos que consideram as decisões do tipo de transporte de carga para distribuição (FTL ou LTL) de forma integrada com as decisões de estoque. No entanto, as características destes problemas são tratadas em outros contextos: no problema de roteamento de veículos com frota particular e carregador comum; em problemas de dimensionamento econômico de lotes com múltiplos modos de reabastecimento; e, em problemas integrados de transporte e estoque.

2.1 Problemas de roteamento com frota particular e carregador comum

Um dos problemas da literatura que inclui decisões sobre o tipo de frota a ser utilizada é o problema de roteamento de veículos com frota particular e carregador comum (*Vehicle routing problem with private fleet and common carrier or extenal carrier* - VRPPC). Neste problema, o fornecedor deve projetar as rotas de modo a garantir um nível de estoque desejado pelo cliente, considerando a possibilidade de contratação de uma transportadora externa quando a empresa não conta com uma frota própria de veículos ou quando a demanda supera essa capacidade. Segundo Ball et al. (1983) o VRPPC é caracterizado por:

1. Determinar o tamanho da frota alugada (veículos FTL necessários),
2. Determinar os clientes que devem ser atendidos pela frota alugada e os que devem ser servidos pela transportadora externa (ou com carga LTL),
3. Determinar as rotas para os veículos da frota alugada.
4. Minimizar os custos de roteamento.

A presença de transportadores externos ou comuns é de suma importância, pois, devido à flutuação da demanda toda a capacidade de caminhões de uma empresa pode se tornar insuficiente à demanda total dos clientes, ou empresas podem terceirizar a suas operações de transporte. Para esses casos, gerentes de logística devem escolher entre contratar um transportador de carga completa (FTL) ou fracionada (LTL). Um caminhão FTL permite à

empresa consolidar várias transferências, em um único caminhão. A transportadora LTL normalmente assume a responsabilidade de encaminhamento de cada remessa da origem ao destino. Geralmente, o frete cobrado por uma operadora LTL é muito maior do que o custo de um caminhão FTL completamente carregado. Selecionar o modo correto de transportar uma carga pode trazer economias significativas de custos para a empresa (CHU, 2005).

No transporte FTL existe um valor fixo por carga até uma determinada capacidade. Portanto, se uma empresa utiliza menos do que a capacidade disponível, o custo é cobrado sobre a carga máxima. Este valor fixo compreende os custos devido ao caminhão (ativo), motorista, e despesas operacionais. Exemplos de transporte FTL são: o uso de caminhões para atender a demanda de um cliente específico ou o uso de vagões e contêineres para atender a demanda do exterior. No entanto, em alguns casos, a quantidade de carga pode não ser grande o suficiente para justificar o custo associado com um carregamento FTL.

Para o transporte de pequenas quantidades costuma ser utilizada a carga fracionada. Para a carga LTL existe um custo unitário de transporte. Um exemplo de transporte LTL é uma transportadora que cobra em função de R\$/kg transportado. A Tabela 2.1 compara elementos de custo do transporte privado e uso de transporte externo ou comum.

Tabela 2.1 - Elementos de custo de frota. Fonte: Adaptado de Min (1998)

TRANSPORTADOR	ELEMENTOS DE CUSTO
Privado	Custo de aquisição ou locação privada
	Custo de depreciação por km para cada operadora privada
	Custo do seguro estimado por km para cada operadora privada
	Custo de manutenção / reparação estimado por quilômetro para cada operadora privada
	Milhas por galão para cada operadora privada
	Salário estimado / salário dos motoristas e despachantes
	Custo estimado para a supervisão motorista
	As taxas para ambas as classes de licenças A e B/ DOT
	Impostos sobre veículos, incluindo impostos por caminhão
	Custo de formação de condutores
Custo do teste driver (incluindo estrada e escrita)	
Comum	Taxa de frete LTL por distância ou peso/volume
	Taxa de frete FTL por distância ou peso/volume
	Carga de Detenção
	Stop-off charge
	Taxa de processamento de reclamação por danos/reclamação de prejuízos

Alguns elementos considerados nos modelos VRPPC são encontrados no problema estudado nesta dissertação porque consideram a possibilidade de uso de um transportador quando uma frota particular também está disponível. Neste sentido, pode se adotar o uso da frota privada como carga completa (FTL) devido a suas estruturas de custo semelhante, sendo em função da capacidade do veículo e da distância percorrida. O objetivo nestes problemas é gerar um planejamento de entrega que minimize basicamente custos de transporte. Diferente do problema tratado nesta dissertação, estes modelos tratam um horizonte de planejamento de único período em uma rede de distribuição geralmente composta por um único centro de distribuição, portanto as considerações de estoque são escassamente tratadas. Além disso, esta dissertação não considerou as atividades de roteamento dos veículos.

Ball et al. (1983) motivado por um problema de distribuição em uma empresa química, foi um dos primeiros a considerar o problema de roteamento na presença de um transportador externo. Neste trabalho, os autores consideraram a frota de veículos como sendo homogênea e limitada. Klincewicz e Luss (1990) apresentaram um modelo para segmentação dos clientes. O tamanho ótimo da frota particular foi determinado de modo a atribuir a cada setor para ser atendido ou com um veículo particular ou com um transportador fracionado.

Chu (2005) abordou o problema de roteamento de uma frota particular e heterogênea de veículos. Baseado em um modelo matemático, o autor desenvolveu uma heurística para despachar os caminhões internos e para fazer uso de carga fracionada minimizando o custo de transporte. Nesta heurística, cada cliente deve ser atendido por um veículo interno ou através de carga fracionada, desta forma combinações entres os dois modos de transporte de carga não estavam disponíveis. Além disso, como a que frota de veículos era assumida como própria, o modelo obriga ao uso de todos os veículos disponíveis, portanto cargas fracionadas só são usadas para satisfazer as demandas restantes.

Em outra pesquisa, Bolduc et al. (2007) propuseram um algoritmo de roteamento para o VRPPC obtendo melhores resultados que os apresentados por Chu (2005). Mais tarde, Bolduc et al. (2008) apresentaram um modelo que, diferente do modelo de Chu (2005), não obriga ao uso de todos os veículos particulares disponíveis. Assim cargas LTL podiam ser usadas mesmo quando a capacidade da frota particular era suficiente para satisfazer a demanda. Essa última característica também está presente no problema abordado neste trabalho, onde cargas fracionadas podem substituir a necessidade de uma frota particular ou de uso de carga completa.

Devido à incorporação de elementos ao problema e ao tamanho das redes de distribuição, estudos mais atuais destacam-se pela implementação de metaheurísticas como abordagem de solução. Côté e Potvin (2009) utilizaram busca tabu para resolver o problema de Bolduc (2008) considerando uma frota homogênea de veículos FTL. Katrica et. al. (2012) aplicaram um algoritmo genético para resolver o problema de Chu (2005). Liu et al. (2010) propuseram um modelo colaborativo entre transportadores que podiam decidir se atender a demanda dos seus clientes com veículos próprios ou atribuí-las para transportadoras parceiras, em compensação o transportador também pode atender clientes externos.

2.2 Problemas de dimensionamento econômico de lotes com múltiplos modos de reabastecimento

Alguns modelos de controle de estoque agregam algumas considerações de transporte para determinação das políticas ótimas de estoque e os modelos de distribuição que incluem as condições de reposição de estoque. Estes modelos são conhecidos na literatura como modelos de lote econômico com múltiplos modos de reabastecimento (*Economic Lot-sizing Problem with Multi-mode Replenishment*).

Modelos deste tipo são similares ao modelo desenvolvido neste trabalho porque consideram a reposição dos estoques quando modos de transporte de carga completa e fracionada estão disponíveis. Custos de transporte e manutenção de estoque são levados em conta para definir a quantidade ou frequência ótima de pedido de acordo com a política de controle de estoque definida (revisão contínua ou periódica). Diferente do problema tratado nesta dissertação, geralmente consideram um único centro de distribuição ou um único cliente, e a demanda normalmente é definida como sendo estática quando múltiplos períodos são considerados. A maioria destes modelos tem base na formulação clássica de lote econômico de pedido.

A formulação EOQ desenvolvida por Harris (1990) em 1913 é talvez o mais fundamental de todos os modelos de inventário. Este modelo foi o primeiro em analisar o *trade-off* existente entre o custo de manutenção de estoque e o custo de pedir ou encomendar. Neste contexto, o custo de transporte normalmente é negligenciado ou incluído indiretamente no custo de pedido (MADADI et al., 2010). No entanto, segundo Zhao et al. (2004) em condições reais não é razoável supor que o custo de transporte é proporcional à quantidade entregue ou é um valor constante, pois ele também está relacionado com a distância percorrida ou combustível consumido.

Extensões do modelo EOQ consideram decisões conjuntas de estoques e transporte. Zhao et al. (2004) abordaram o problema de lote econômico e frequência de pedido para um sistema de distribuição onde tanto os custos fixos e variáveis de transporte foram incluídos. Agrawal e Smith (2013) formularam um modelo para determinar o tamanho ótimo do pedido e a alocação de estoque nas lojas com demandas não idênticas e estocásticas. Ambos os trabalhos fornecem formulações interessantes EOQ, no entanto consideraram uma rede de distribuição de apenas um cliente e único fornecedor.

Modelos de estoque incorporando o modo de transporte de carga completa têm sido estudados há vários anos por diferentes autores Lippman (1969), Iwaniec (1979) e Aucamp (1982). No trabalho de Li, Hsu e Xia (2004) custos de frete FTL não lineares (estruturas de descontos) foram considerados. Nesse modelo, os autores assumiram o custo do transporte como uma função independente das quantidades a serem transportadas. Esta estrutura de custos se mantém ainda nos modelos atuais, onde a capacidade do veículo limita as quantidades a serem transportadas. A inclusão de características dos modos de transporte, como o tempo de entrega, é particularmente importante dado que estes parâmetros de transporte ajudam a definir as melhores políticas de inventário (EKSIUGLU, 2009; MADADI; KURZ; ASHAYERI, 2010).

Por outro lado, modelos de estoque com inclusão de carga fracionada (LTL) foram inicialmente tratados por Lee (1986) que considerou o modelo EOQ com custo de encomendar, manter e custo de frete. O custo do frete estava sujeito a descontos de quantidade. Hwang et al. (1990) ampliaram o modelo de estoque de Lee (1986) ao incluir também descontos nos custos de aquisição por unidade pedida. No trabalho de Kutanoglu e Lohiya (2008), de forma similar ao modelo aqui apresentado, questões como nível de serviço em uma rede de múltiplos CD e múltiplos clientes, *lead time* de atendimento e níveis de estoque de segurança foram tratados. No entanto, eles não consideraram carga completa e o modelo foi definido para um único período. Hwang et al. (1990), Tersine e Barman (1994) e Kutanoglu e Lohiya (2008) apresentam outros trabalhos relevantes.

Questões de nível de serviço foram também discutidas por Deshpande et al. (2011). Os autores apresentaram um modelo para determinar os níveis de estoque e períodos de reposição. Este estudo ressaltou o papel ativo do inventário sobre a natureza da cadeia de suprimentos, sendo focada na eficiência (rentabilidade) ou focada na agilidade (resposta rápida). Para o segundo caso, níveis de estoque eram relativamente maiores. Os autores propuseram uma abordagem de solução de programação de metas *fuzzy* que determinou a

solução baseada nas preferências dos decisores. Restrições de capacidade de armazenagem, quantidade mínima expedida e limites inferiores e superiores para os períodos de revisão foram também incluídos. O trabalho foi particularmente interessante, porque tratou um modelo multiobjetivo para incluir os custos associados aos clientes (pedido e manutenção de estoque), custos associados aos centros de distribuição e ao transporte, levando em conta ainda os tempos de atendimento e nível de serviço para estabelecer as políticas de estoque.

Além das abordagens individuais de modos de transporte de carga completa e fracionada, alguns autores abordaram estes problemas através de comparações de eficiência e economia entre os dois modos de transporte. Swenseth e Godfrey (2002) consideraram modelos de estoque com carregamentos FTL e LTL como problemas independentes e compararam as políticas de estoque para cada cenário a fim de escolher o modelo mais econômico. Os autores apresentaram um modelo para determinar o peso mínimo para o qual uma carga em particular deve ser transportada como carga completa e, no caso contrário, transportada como carga fracionada. Como uma abordagem mais integrada, Mendoza e Ventura (2008) desenvolveram um modelo EOQ considerando carga completa e fracionada simultaneamente. O modelo incluiu estruturas de desconto incrementais para os carregamentos fracionados. Algoritmos foram propostos para determinar o tipo de carga e para calcular políticas ótimas de estoque sobre um horizonte de planejamento. Os autores concluíram que, em alguns casos, é mais benéfico usar os dois modos de transporte de carga de forma conjunta. Rieksts e Ventura (2010) discutiram modelos de estoque com demanda constante e os modos de transporte FTL e LTL. Neste problema, a política de controle de estoque foi de revisão contínua em um cenário onde faltas não eram permitidas. Outros trabalhos mais atuais de EOQ com os dois modos de transporte de carga foram desenvolvidos por Jaruphongsa et al. (2005) e Toptal e Bingöl (2011).

Como observado, em muitas pesquisas desta categoria, descontos por quantidade transportada representam um elemento importante e comumente presente. Segundo Mendoza e Ventura (2008), uma estrutura de desconto é estabelecida pelos transportadores para incentivar as organizações a transportar quantidades maiores.

Como discutido por Nahmias (2001), existem três tipos de sistemas de descontos comumente utilizados na prática, eles são: o desconto sobre todas as unidades (*all-units discounts*), os descontos incrementais (*incremental quantity discounts*) e o esquema de desconto FTL.

No esquema de desconto sobre todas as unidades, diferentes taxas de desconto aplicam-se a todas as unidades de diferentes volumes de transporte, uma vez que um ponto de quebra (*Breakpoint*) for atingido (Figura 2.1.).

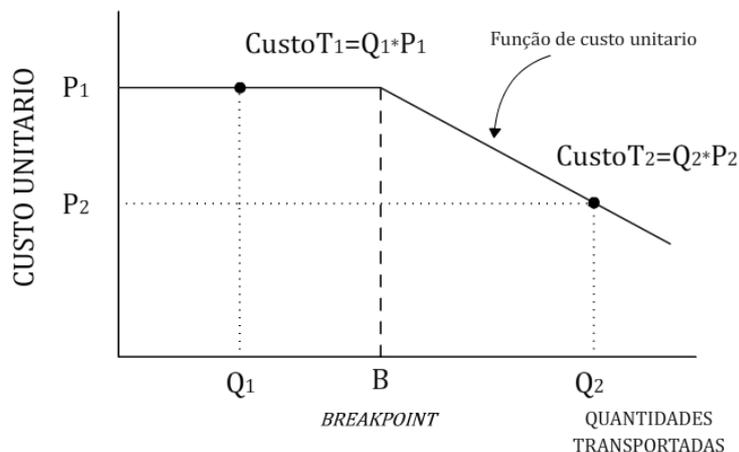


Figura 2.1- Estrutura de descontos sobre todas as unidades. Fonte: Aatoria

No regime de descontos incrementais diferentes taxas de desconto são aplicadas aos intervalos incrementais (por peso, volume ou unidades). Para essa estrutura, o desconto é aplicado unicamente para as unidades maiores ao *breakpoint* (Figura 2.2.).

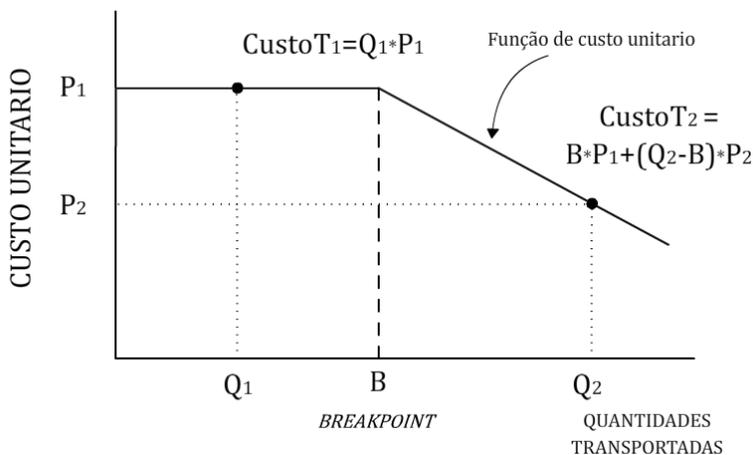


Figura 2.2 - Estrutura de descontos incrementais. Fonte: Aatoria

O terceiro tipo, e o menos comum, é o esquema de desconto FTL, também conhecido como o regime de descontos da frota. Aqui o prestador de serviço de transporte cobra uma taxa do tipo LTL até que o cliente paga o custo de um caminhão carregado de certa capacidade. Uma análise mais detalhada é apresentada por Li, Hsu e Xia (2004).

Nesta pesquisa, utiliza-se uma estrutura de desconto sobre todas as unidades, considerando que na prática a maioria das organizações trabalha com base nesta estrutura de

desconto. Uma visão geral das pesquisas com quantidades descontadas é apresentada por Munson e Rosenblatt (1998), que realizaram um estudo exploratório sobre as diferentes estruturas de descontos utilizadas na prática. Os autores descobriram que 95% das empresas estudadas preferem oferecer, ou receber, o tipo de desconto sobre todas as unidades. Além disso, 37% dessas empresas oferecem ou recebem descontos de quantidade incrementais.

2.3 Problemas integrados de transporte e estoque

Segundo Hanczar (2011), os problemas integrados de distribuição e estoque (*Joint Transportation and Inventory Problems - JTIP* ou *Integrated Inventory Distribution Problem - IIDP*) são caracterizados pela presença de ambas as considerações de transporte e estoque, por meio de variáveis ou restrições, com objetivo de encontrar as políticas ideais de transporte e estoque. Na prática empresarial, diferentes situações refletem a importância destes problemas, por exemplo, um sistema de estoques gerido pelo fornecedor (*Vendor Managed Inventory – VMI*), no qual o fornecedor assume a responsabilidade pela manutenção dos níveis de estoque dos clientes (KANG; KIM, 2010; LIU; YE, 2009; SHU et al., 2012).

Diferente dos problemas anteriormente apresentados, o foco do JTIP não é o estudo dos múltiplos modos de transporte, pois a maioria dos modelos não consideram transportadores externos. Estes modelos analisam especialmente a relação de conflito entre custos de transporte e estoque em um horizonte de planejamento multiperíodo.

Um problema JTIP refere-se à distribuição repetida de um produto a partir de um fornecedor para um conjunto de clientes ao longo de um horizonte de planejamento determinado. Cada cliente tem uma demanda periódica conhecida do produto e uma capacidade máxima de armazenagem. Geralmente, o centro de distribuição opera uma frota homogênea de veículos com uma capacidade limitada, usada para entregar os suprimentos. O objetivo do problema é minimizar o custo total de distribuição e estoque ao longo do horizonte planejado, sob o pressuposto de que nenhum dos clientes admite falta de estoque. Uma solução a um problema JTIP é uma forma detalhada de distribuição. Isto se refere às quantidades e datas de envio, bem como às vias de entrega para cada veículo em cada período. Uma solução deste tipo é conhecida como uma política de reposição e de distribuição de inventário (HANCZAR, 2011).

Segundo Baita et al. (1998), estes problemas lidam com a forma de gerir o fornecimento de bens a partir de origens (uma ou várias) para destinos (um ou vários) durante um horizonte de tempo (finito ou infinito), considerando-se tanto problemas de estoque como problemas de distribuição. Neste contexto, as questões específicas a serem abordadas são:

- Quando os envios devem ser feitos? Ou seja, quando os caminhões devem ser carregados e quando os clientes devem ser atendidos?
- Quanto deve ser carregado em cada veículo? Em termos da quantidade de cada produto examinado, e como esta carga tem que ser distribuída entre os clientes que solicitam?
- Qual rota deve ser seguida por cada veículo a fim de visitar todos seus clientes?

O problema abordado neste trabalho refere-se às duas primeiras decisões. A terceira decisão não foi considerada devido às características estratégicas e táticas do problema.

O trabalho de Beltrami e Bodin (1974) pode ser considerado como um dos primeiros sobre estes tipos de problema. Porém o foco foi na modelagem e técnicas de solução simples e não na resolução do problema. Posteriormente Bell et al. (1983) através de modelos matemáticos resolveram, o problema para pequenas instâncias. A primeira aproximação para resolver um problema de tamanho real foi feita por Dror, Ball e Golden (1985) que investigaram a grande rede de distribuição de gás propano líquido para clientes residenciais e industriais.

Precisamente, devido à complexidade das redes de múltiplos clientes e múltiplos períodos, alguns autores nesta categoria têm se preocupado com abordagens de solução. Kim e Kim (1999) desenvolveram um modelo para longas distâncias, que similar ao modelo aqui proposto permite ao veículo tardar mais de um período no atendimento do cliente. Um algoritmo heurístico de duas fases foi desenvolvido. Por outro lado, Kim e Kim (2000) desenvolveram um modelo para curtas distâncias, onde os veículos de capacidade heterogênea podiam ir e voltar repetidas vezes no mesmo período. Uma abordagem de relaxação Lagrangeana foi usada. Abdelmaguid (2004) propôs uma heurística de construção para o JTIP. A heurística foi baseada nos problemas de dimensionamento de lotes sem restrições de capacidade, de forma que as reposições de estoques somente eram feitas quando o estoque do cliente esgotava. Usando estes princípios, a heurística foi usada para gerar soluções dos cronogramas de entrega em um horizonte definido.

Shu, Teo e Shen (2005) estudaram um problema para definir os fluxos de mercadoria em uma rede de distribuição considerando inventário com demandas estocásticas. O objetivo do modelo foi minimizar os custos de transporte, inventário e estoque de segurança. Um único modo de transporte foi considerado e devido às condições não determinísticas da demanda, estoques de segurança foram necessários para garantir níveis de serviço adequados. Eskigun et al. (2005) trataram também um problema de distribuição em um uma cadeia de suprimentos

no setor automotivo considerando prazos de entrega. Análises de cenários foram realizadas para lidar com as condições de demanda estocásticas. Os custos de transporte foram considerados proporcionais às unidades transportadas. Procurou-se minimizar os custos de transporte, fixos e de *lead time* (estoque em trânsito). Uma heurística Lagrangeana foi utilizada para resolver o problema de tamanho real.

Gebennini et al. (2009), trabalharam em um caso real de distribuição de produtos eletrônicos de uma empresa italiana. A proposta determinou os níveis ótimos de estoque de segurança em todas as instalações de armazenamento disponíveis. Li et al. (2010) aplicaram uma abordagem híbrida entre método exato e a metaheurística colônia de formigas para resolver o JTIP minimizando custo de transporte, de estoque e de desabastecimento ainda considerando uma frota homogênea e características do *lead time*. Tsao e Lu (2012) desenvolveram um modelo que integrou os custos de estoque, custos de transporte e de pedido. Os custos de transporte foram definidos em função das quantidades ordenadas, incluindo descontos por quantidade. Sadjady e Davoudpour (2012) propuseram um modelo de distribuição considerando os custos de estoque em trânsito dependentes do *lead time* e custos de manutenção de estoques. Diferentes transportadoras fracionadas (LTL) foram consideradas.

Como mencionado anteriormente os sistemas de estoques geridos pelo fornecedor (*Vendor Managed Inventory* - VMI) são de muita relevância neste contexto, pois o fornecedor assume a responsabilidade pela manutenção dos níveis de estoque dos clientes e preocupa-se também com os custos próprios de operação e transporte. Este sistema é semelhante ao problema tratado nesta pesquisa porque o CD funciona como fornecedor. Nesse sentido, a partir dos CDs devem se definir os períodos nos quais os clientes serão atendidos e os níveis de segurança que devem ser mantidos. Esta integração é permitida neste modelo porque o fornecedor e os varejistas são diferentes escalões de uma única empresa.

Kang e Kim (2010) estudam um sistema VMI similar ao problema aqui estudado. O problema original foi dividido em dois subproblemas e a solução para o problema original foi obtida pela combinação das soluções. O primeiro problema consistia em determinar as quantidades e tempos de reposição para os clientes e o segundo definia a quantidade de produtos entregues aos varejistas por cada veículo. Shu et al. (2012) e Abdelmaguid e Dessouky (2006) aprofundaram mais sobre estes sistemas VMI.

Nos trabalhos revisados, os autores afirmam que a consideração de um modelo integrado fornece melhores soluções para a cadeia de suprimentos do que tratar as decisões de

transporte e estoque separadamente. Outros trabalhos semelhantes foram desenvolvidos por Kang e Kim (2010), Liu e Ye (2009) e Zhao et al. (2010). Oportunamente, Melo et al. (2009) realizaram uma revisão de literatura na gestão da cadeia de suprimentos para a integração de diferentes decisões, tais como: a localização e capacidade, gestão de inventário, compra, produção, roteamento e escolha entre modos de transporte. Destacando a importância da integração neste tipo de decisões.

2.4 Considerações finais

Embora exista uma extensa literatura sobre problemas de transporte, distribuição e gestão de estoques, cabe ressaltar que pouca pesquisa aplicada foi encontrada, especialmente para a entrega de mercadorias em uma rede complexa e real de múltiplos CDs, múltiplos clientes e múltiplos períodos. Alguns destes modelos são limitados ou pouco adequados para tratar situações reais. Portanto, existe ainda uma lacuna entre os modelos propostos na teoria e a prática. Neste sentido, a proposição de um modelo para a integração das decisões de transporte e estoque baseado em um sistema de distribuição real pode contribuir para a literatura e apoiar as decisões em sistemas logísticos.

O problema tratado nesta dissertação tem características de cada um dos trabalhos mencionados anteriormente. Contudo, diferente da literatura existente, centra-se no estudo de um sistema de distribuição onde dois modos de transporte de carga, com capacidades e estruturas de custos diferentes, estão disponíveis.

A Tabela 2.2 apresenta um resumo e proposta de classificação dos modelos mais relevantes para esta pesquisa, em relação a aspectos como: configuração da rede de distribuição, modos de transporte de carga disponíveis, controle de estoque e parâmetros de serviço, características da demanda, abordagens de solução e características da função objetivo. O modelo matemático proposto nesta dissertação também foi classificado. A explicação de cada notação adotada se encontra logo após a tabela.

REFERÊNCIA AUTOR (ANO)	CONFIG REDE			MODOS TRANSP			ESTOQUE E SERVIÇO			DEMAND			ABORD SOL			OBSERVAÇÕES Função objetivo/ Aplicação ou estudo teórico/ considerações importantes.		
	M-CD	M-CL	M-T	FTL	LTL	F+L	DESC	POL.	SS	NS	LT	DN	STC	M-P	EXT		HEU	MET
SEÇÃO 2.1	x	x	x	x	x	x	x								x	x	x	Minimiza custos de transporte. Aplicação ind. Química.
		x	x	x	x	x							x		x	x	x	Minimiza custos de transporte fixo e variáveis
		x	xx	xx	xx	xx									x	x	x	Minimiza custos de transporte fixo e variáveis
		x	xx	xx	xx	xx									x	x	x	Minimiza custos de transporte fixo e variáveis
		x	x	x	x	x									x	x	x	Minimiza custos de transporte fixo e variáveis
		x	x	x	x	x									x	x	x	Max renda= Compensações- custos de transp.
		x	x	x	x	x									x	x	x	Minimiza custos de transporte fixo e variáveis
									C						x	x		Minimiza custos de ordenar e manutenção de estoque
									P					x	x	x		Minimiza custos de transp., faltante, ordenar e manter estoque
									C						x	x		Minimiza custos de transporte e manter estoque
									A						x	x		Minimiza custos de manter, transp. e ordenar com desconto
	SEÇÃO 2.2																	
								A/I							x	x		Minimiza custo de transp., ordenar, manter estoque e trânsito
								A							x	x		Min custos de ordenar, transporte e manter estoque
								A							x	x		Minimiza custos de transporte e manter estoque
								A							x	x		Minimiza custos de transporte, ordenar e manter estoque
								A/I							x	x		Minimiza custos de transporte, faltante e manter estoque
								P							x	x		Minimiza custos de transporte, ordenar e manter estoque
								P							x	x		Minimiza custos de transporte, faltante e manter estoque
								A/I							x	x		Minimiza custos de transporte, faltante e manter estoque
								C							x	x		Minimiza custos de transporte, faltante e manter estoque
								C							x	x		Minimiza custos de transporte, faltante e manter estoque
SEÇÃO 2.3									C									
								C							x	x		Minimiza custos de transporte e manter estoque no CD
								P	x						x	x		Minimiza custos de transp., faltantes e manter estoque
								C							x	x		Minimiza custos de transp., faltantes e manter estoque
								C							x	x		Minimiza custos de transp., faltantes e manter estoque
								C							x	x		Minimiza Custos de transp., pedir e manter estoque
								C							x	x		Minimiza custos de transporte e manter estoque
								C	x						x	x		Minimiza C. de transp. e estoque. Aplicação Industrial.
								C							x	x		Minimiza custos de transporte, ordenar e manter estoque
								C							x	x		Min C. Transp., estoques, estoq. em trânsito. Restrições de acesso.
								A/I							x	x		Estoque de segurança como var. saída. Apl. Ind. Telecomunicações.

Tabela 2.2 - Classificação da literatura relevante.

O campo “configuração da rede” indica se o modelo considera múltiplos centros de distribuição (M-CD), múltiplos clientes (M-CL) ou múltiplos períodos no planejamento (M-T). O campo “modo de transporte” indica sobre a consideração de carga completa (FTL) através de uma frota de veículos homogênea (x) ou heterogênea (xx), ou sobre a consideração de carga fracionada (LTL). Indica também se o modelo permite combinações de atendimento entre os dois modos de transporte de carga para um mesmo cliente (F+L) e sobre o tipo de desconto disponível para a carga fracionada. Sendo para todas as unidades (*All units - A*) ou descontos incrementais (*Incremental discount - I*).

O campo “estoque e serviço” faz referência ao tipo de política de controle de estoque utilizada na modelagem, revisão contínua (C) ou periódica (P). Além disso, especifica sobre a consideração de estoques de segurança, sendo um parâmetro de entrada (x) ou uma saída (xx). Por fim, indica se o modelo presume um nível de serviço ao cliente (NS) e se tempos de transporte (*Lead Time -LT*) são considerados.

O campo “características da demanda” descreve a demanda dos clientes como sendo estática ou dinâmica (DIN) e determinística ou estocástica (STC). Também faz referência a presença de múltiplos itens (M-P). A abordagem de solução diz sobre como o modelo é tratado, utilizando uma abordagem exata (EXT), heurística (HEU) ou metaheurística (MET). Finalmente apresenta-se a função objetivo e algumas considerações importantes.

No próximo capítulo, uma descrição mais detalhada do problema é apresentada, bem como o modelo matemático proposto para representar adequadamente as características do sistema em estudo.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA

O objetivo deste capítulo é propor um modelo matemático para tratar as decisões envolvidas na distribuição e estoque de mercadorias. O modelo matemático está baseado em considerações revisadas nos modelos do capítulo 2 e na observação das atividades logísticas de uma empresa característica do setor das telecomunicações.

Neste capítulo também serão apresentadas as soluções geradas pela formulação proposta e estudos computacionais para avaliar a adequação das mesmas para representar o problema. O modelo matemático é parte fundamental na abordagem proposta, pois é usado para a geração de alternativas que serão analisadas.

3.1 Considerações para modelagem

O problema de distribuição abordado neste trabalho envolve o planejamento da entrega de mercadorias a partir de centros de distribuição até os diferentes clientes para satisfazer as quantidades demandadas. Em geral, procura-se minimizar o custo de transporte da rede e os custos estoque nos centros de distribuição regionais. Resolver problemas deste tipo, onde as mercadorias são enviadas a partir de vários depósitos para os clientes e através de múltiplos modos de transporte, muitas vezes implica um elevado tempo computacional e encontrar a solução ótima nem sempre é possível em um tempo de execução razoável para as organizações. Estes problemas são classificados dentro da categoria de problemas NP-hard (ABDELMAGUID; DESSOUKY, 2006; NUNKAEW; PHRUKSAPHANRAT, 2010).

A Figura 3.1 ilustra a rede de distribuição sobre a qual se fundamenta este problema. Uma simplificação foi feita para considerar a distribuição unicamente desde os centros de distribuição até os centros regionais. As demandas dos clientes finais foram agregadas para os seus CD regionais alocados e as atividades de roteamento não foram consideradas. Os custos de fornecimento dos produtos até os centros de distribuição foram assumidos como cobertos pelo fornecedor e, portanto, também não foram incluídos na modelagem. Desta forma, o problema consiste em determinar as quantidades e datas de entrega para os CD regionais, assim como a alocação da carga dentro das alternativas de transporte disponíveis (FTL e LTL). A determinação dos níveis de estoque de segurança para cada CD regional também faz parte do problema e foram definidos levando em conta a variabilidade da demanda e os tempos de atendimento. O objetivo é a minimização dos custos de transporte, custos de manutenção de estoque e custos de estoque em trânsito dentro de um horizonte de planejamento finito definido.

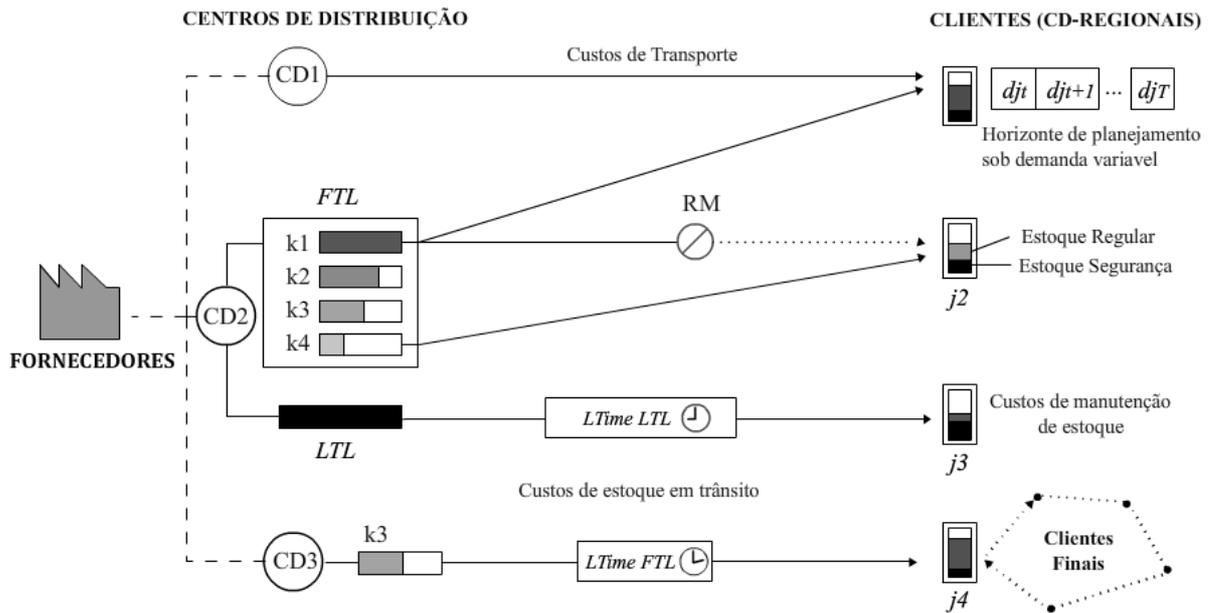


Figura 3.1 - Descrição da rede de distribuição

Para a modelagem matemática foram necessários os seguintes pressupostos e considerações:

Atendimento da demanda: Múltiplos centros de distribuição devem satisfazer a demanda de um conjunto de clientes dispersos geograficamente. Os clientes finais estão subgrupados em *clusters*, e centros de distribuição regionais foram localizados para satisfazer as demandas agregadas. Este processo de clusterização não faz parte do escopo deste trabalho, bem como o roteamento dentro dos *clusters*. Por simplicidade, os centros de distribuição regionais serão denominados como clientes (CL).

Múltiplas alternativas de transporte / modos de transporte de carga: Os modos de transporte de carga completa (FTL) e fracionada (LTL) foram considerados. Permite-se para um cliente ser atendido por ambos os modos de transporte no mesmo período de tempo. Devido às formas de operação distintas entre estas duas alternativas, os tempos de transporte e a sua variabilidade foram considerados diferentes.

Veículos heterogêneos para carga completa: Para uma carga FTL, um valor fixo é constituído em função da capacidade do veículo e da distância percorrida. Qualquer custo variável dependente da quantidade de carga é considerado pouco significativo. Assume-se que existe uma frota heterogênea de veículos FTL grande o suficiente para realizar as entregas. A Figura 3.2 apresenta a estrutura de custos em função do volume da carga para três tipos de veículos FTL. Nota-se que o custo de alugar um veículo é o mesmo independente de se ele é carregado completa ou parcialmente.

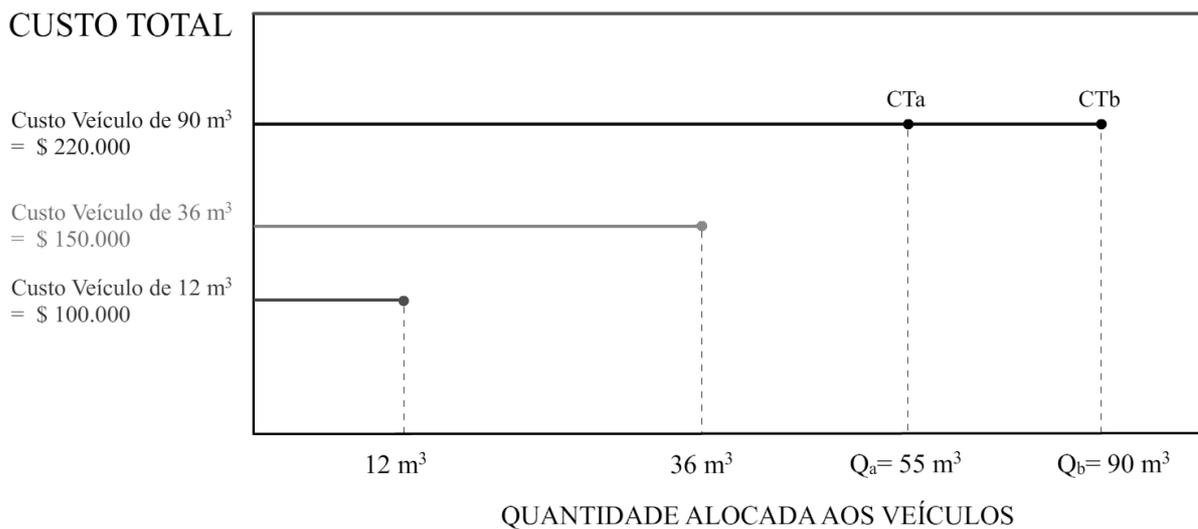


Figura 3.2- Estrutura de custos para carregamento FTL.

Para este problema, os veículos FTL consideram-se heterogêneos em capacidade e custo, mas homogêneos em tempos de transporte devido às políticas de velocidade máxima estabelecidas nos transporte rodoviário.

Restrições de acesso por veículos: Devido às regulamentações no transporte rodoviário de cargas, consideram-se restrições de acesso por veículos. Isto implica que veículos FTL de uma determinada capacidade não podem atender alguns clientes particulares. Geralmente estes clientes representam cidades grandes com restrições de tráfego de veículos.

Carga fracionada: Para as cargas LTL, o custo é baseado na quantidade embarcada e na distância percorrida. Um exemplo de carga fracionada é um carregamento enviado via operador logístico e cobrado em função do peso. Ao consolidar cargas de diferentes empresas para o mesmo envio, os 3PL podem transportar pequenas quantidades com baixos custos (RIEKSTS; VENTURA, 2010). Em contrapartida, as cargas fracionadas, por serem compartilhadas entre cargas de diferentes empresas, geralmente são transferidas várias vezes antes de chegar a seu destino. Portanto, levam mais tempo que uma carga completa normal.

Estruturas de descontos LTL: Usualmente na estrutura de custos das cargas fracionadas existem vários pontos de quebra no qual o preço por unidade transportada diminui. Nestas estruturas, a função de custo unitário é uma função fragmentada (Figura 4.3a) e a função de custo total é uma função contínua com pente variante (Figura 4.3b). Nesta dissertação será apresentado um modelo para tratar esta estrutura de desconto sobre todas as unidades.

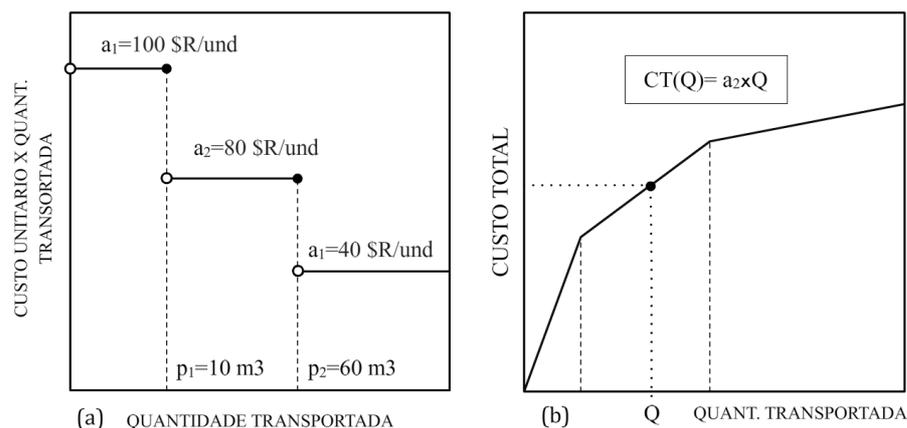


Figura 3.3 - Estrutura de custos no carregamento LTL

Nível de serviço e estoque de segurança: Nos problemas de distribuição, existe um importante *trade-off* entre a minimização dos custos de inventário e maximização do nível de serviço ao cliente. Este *trade-off* tem sido tradicionalmente gerenciado quantificando os melhores níveis de estoque de segurança (*Safety Stock* -SS) para cada item e para todos os locais de armazenamento na rede de distribuição (GEBENNINI et al, 2009). Como descrito por Ballou (2006), um maior estoque de segurança geralmente implica elevados custo de manutenção de estoque, porém afeta positivamente o nível de serviço por meio da disponibilidade. Busca-se um equilíbrio entre dois elementos conflitantes.

A incorporação dos estoques de segurança é necessária devido à variação observada dos tempos de atendimento e da demanda, e ao desejo de alcançar um nível de serviço determinado. Portanto, além do estoque regular mantido para suprir a demanda média, uma quantidade adicional foi adicionada ao estoque. O volume deste estoque de segurança (SS) é inversamente proporcional à probabilidade de ocorrência de uma situação de falta de estoque (BALLOU, 2006, p.286).

Para o cálculo do estoque de segurança foi utilizado um modelo de controle avançado de estoque puxado, especificamente o método do ponto de pedido com incerteza na demanda e no tempo de entrega. O acréscimo da variância da demanda e do tempo de entrega resulta na fórmula revisada para o estoque de segurança como apresentada em Ballou (2006, p. 286):

$$SS = \phi_{\alpha} \times \left(\sqrt{LT(\sigma D_d)^2 + (D_d \times \sigma LT)^2} \right) \quad (3.1)$$

Na formulação, o termo $\left(\sqrt{LT(\sigma D_d)^2 + (D_d \times \sigma LT)^2} \right)$ é o desvio padrão da demanda durante o *lead time*. LT e σLT são a média e o desvio padrão do *lead time* da entrega. D_d e σD_d representam a média e o desvio padrão da demanda diária respectivamente. Com ϕ_{α} , o

número de desvios padrão correspondente a um nível de serviço α . O nível de serviço geral para o sistema de distribuição pode ser individualizado atribuindo níveis de serviço diferentes para cada cliente, basta escrever o parâmetro ϕ_α da forma $\phi_{\alpha j}$. Eppen e Martin (1988) trabalharam sobre esta abordagem de controle de inventário.

Custos de falta de estoque não foram incluídos na modelagem. Mesmo quando os custos de falta de estoque poderiam ser facilmente adicionados, não é necessário incluí-los quando um nível de serviço já foi considerado (BALLOU, 2006, p. 289). Isto ocorre porque a consideração conjunta de custos de falta na função objetivo e o cálculo dos níveis de estoques de segurança podem superestimar as quantidades de estoques no sistema.

Dentro de outros pressupostos importantes para a modelagem, não foram consideradas restrições de atendimento exclusivo entre clientes e centros de distribuição. Isso implica que um cliente pode ser atendido por qualquer e por mais de um centro de distribuição. Por outra parte, um veículo completo pode visitar um único cliente em cada viagem. Este pressuposto é valido especialmente para os casos onde grandes distâncias devem ser percorridas.

As características da modelagem proposta são resumidas com segue:

- Tratamento de uma demanda variável e não conhecida por meio de uma abordagem linear determinística.
- Controle de estoque considerando elementos do transporte, como o *lead time*, e levando em conta ainda a variabilidade desse parâmetro.
- Consideração de múltiplos centros de distribuição e diferentes alternativas de transporte de carga ainda com veículos heterogêneos em capacidade.
- Consideração de restrições de acesso para veículos de grande capacidade.
- Estrutura de custos de desconto por unidade para cargas fracionadas.
- Garantia de um nível de serviço estabelecido pelos decisores, através da determinação de níveis de estoque de segurança em cada cliente.
- Consideração de um abrangente *mix* de custo (transporte, manutenção de estoque e estoque em transito) em procura de uma otimização mais global.

3.2 Modelo matemático integrado de distribuição e estoque

Um modelo linear inteiro misto (*Mixed Integer Linear Programming* - MILP) foi proposto para minimizar os custos relevantes associados ao sistema de distribuição e para garantir um nível de serviço definido antecipadamente. A seguir são definidos os índices, parâmetros e variáveis do problema.

Conjunto de Índices

- CD Conjunto de centros de distribuição, indexado por i .
- CL Conjunto de clientes ou centros de distribuição regionais, indexado por j .
- K Conjunto de tipos de veículos FTL, indexado por k .
- S Conjunto de faixas de custo unitários para a carga LTL, indexado por s .
- T Conjunto de períodos, indexado por t .

Parâmetros

- D_{jt} Demanda do cliente j no período t [m^3]
- Dd_j Demanda média diária do cliente j , $Dd_j = (D_{jt}/\text{número de dias do periodo})$ [m^3]
- σDd_j Desvio padrão da demanda média diária do cliente j [m^3]
- c_{ijk} Custo de atendimento desde o centro de distribuição i até o cliente j com o tipo de veículo FTL k [R\$/veículos]
- B_k Capacidade do tipo de veículo k [m^3]
- a_{ijs} Custos de transporte unitário LTL, da faixa de custos s , para o atendimento do cliente j desde o centro de distribuição i [R\$/ m^3]
- p_s Ponto de quebra da faixa de custos s para o transporte LTL [m^3]
- LF_{ij} *Lead time* de atendimento médio desde o CD i para o cliente j com carga FTL [dias]
- σL_{ij} Desvio padrão do *lead time* desde o CD i para o cliente j com carga FTL [dias]
- LL_{ij} *Lead time* de atendimento médio desde o CD i para o cliente j com carga LTL [dias]
- σLL_{ij} Desvio padrão do *lead time* desde o CD i para o cliente j com carga LTL [dias]
- h_j Custo unitário de manter estoque no cliente j [R\$/ m^3]
- e_j Custo unitário de manter estoque em trânsito para o cliente j [R\$/ $m^3 \times \text{dia}$]
- α Porcentagem desejada de não ter faltantes durante o *lead time*, nível de serviço [%]
- ϕ_α Número de desvios padrão relacionados ao nível de serviço α , tal que $P(Z \leq \phi_\alpha) = \alpha$.
- G_j Capacidade de armazenagem do cliente j [m^3]
- P_i Quantidade máxima permitida para distribuir desde o CD i no período t [m^3]
- RM_{ijk} 1 se o veículo tipo k não esta restrito por acesso para atender ao cliente j desde o CD i , 0 caso contrario.
- RF_{ij} 1 indica se o cliente j pode ser atendido em menos de um período desde o CD i e com carga completa (FTL), 0 caso contrario.
- RL_{ij} 1 indica se o cliente j pode ser atendido em menos de um período desde o CD i e com carga fracionada (LTL), 0 caso contrario.
- M Número suficientemente grande

Os parâmetros RF_{ij} e RL_{ij} são utilizados para evitar as situações específicas dos problemas de longas distâncias em que clientes localizados geograficamente a mais de um período de atendimento, sejam servidos em menos de um período.

Variáveis de decisão

X_{ijkt} Número de veículos FTL do tipo k enviados no período t desde o CD i para atender ao cliente j [Veículos]

Y_{ijst} Quantidade enviada no período t de carga LTL dentro da faixa de custos s desde o CD i para atender ao cliente j [m^3]

I_{jt} Quantidade em estoque regular no cliente j ao final do período t [m^3]

\overline{SS}_j Estoque de segurança sugerido para o cliente j

Variáveis auxiliares

W_{ijkt} 1 se o veículo FTL do tipo k é enviado no período t desde o centro de distribuição i para atender ao cliente j , 0 caso contrario

Z_{ijst} 1 se carga LTL na faixa de custos s é usada no período t desde o CD i para atender ao cliente j

Q_{jt} Quantidade de mercadoria recebida pelo cliente j no período t [m^3]

ss_{jt} Determina a quantidade de estoque de segurança para o cliente j no período t [m^3]

Função objetivo

A função objetivo consiste em minimizar os custos do sistema de distribuição, incluindo os custos relacionados ao transporte e estoque simultaneamente (equação 4.2).

$$\begin{aligned}
\text{Minimizar } \psi = & \sum_{i \in CD} \sum_{j \in CL} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} c_{ijk} X_{ijkt} \\
& + \sum_{i \in CD} \sum_{j \in CL} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} a_{ijs} Y_{ijst} \\
& + \sum_{i \in CL} \sum_{j \in CL} \sum_{t \in T} e_j \left(LF_{ijk} \sum_{k \in K} (X_{ijkt} B_k) + LL_{ij} \sum_{s \in S} Y_{ijst} \right) \\
& + \sum_{j \in CL} \sum_{t \in T} h_j \overline{SS}_j \\
& + \sum_{j \in CL} \sum_{t \in T} h_j [(I_{jt-1} + Q_{jt} - I_{jt})/2 + I_{jt}]
\end{aligned} \tag{3.2}$$

O primeiro termo representa os custos de transporte com carga FTL determinado pelo número de veículos usados de cada tipo. O segundo termo inclui os custos de atendimento com carga LTL, que dependem das faixas de custo por unidade transportada. O terceiro elemento define os custos de manter estoque em trânsito, considerando o transporte por carga FTL e LTL. O quarto somatório determina os custos de manutenção de estoque de segurança dado um nível de serviço estabelecido. Finalmente, o último termo representa os custos de manutenção de estoque regular.

A Figura 3.4 ilustra os tipos de estoque presentes na função objetivo. Nota-se para o plano ilustrado, que o estoque de segurança é mantido constante durante todo o horizonte de planejamento enquanto o estoque regular varia estrategicamente para satisfazer as demandas ou para se antecipar a períodos futuros. O cálculo do último somatório da função objetivo pode ser verificado na Figura 3.4, onde o inventário final de estoque regular (I_{jt}) é mantido ao longo do período e a quantidade restante ($I_{jt-1} + Q_{jt} - I_{jt}$) é consumida uniformemente.

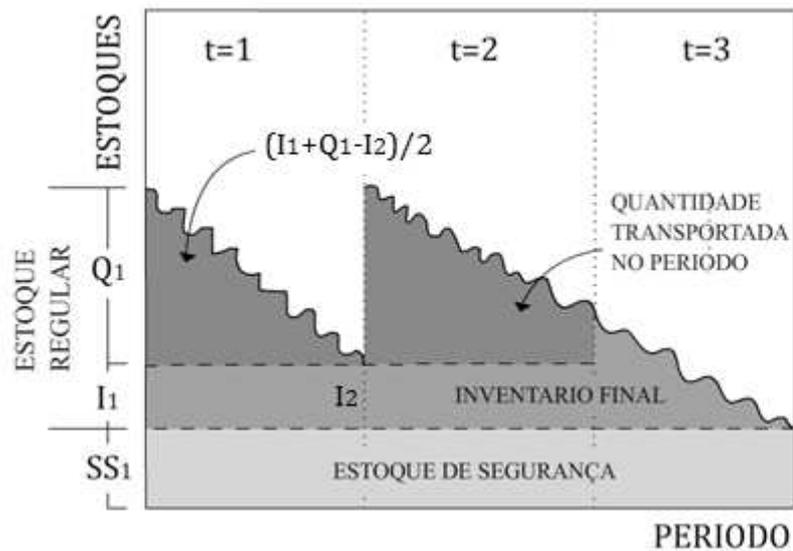


Figura 3.4 - Tipos de estoque considerados no problema

O estoque de segurança é constante durante o horizonte de planejamento e é um suporte caso o estoque regular seja insuficiente para atender a demanda (devido à variação da demanda e do *lead time*). Por outro lado, o estoque regular é composto pelo inventário inicial e pelas quantidades transferidas ao cliente durante o período. Diferentemente do estoque de segurança, o estoque regular varia de um período a outro e, ainda, varia durante o período em função da demanda. Finalmente, as quantidades não consumidas de estoque regular durante o período transformam-se em inventário inicial do período seguinte.

Restrições:

Balanceamento de estoque regular (3.3): A quantidade final de produto estocado no período anterior, mais a quantidade recebida dos centros de distribuição no período atual, menos a demanda média do período deve ser igual ao inventário final do período em análise.

$$I_{jt-1} + Q_{jt} - D_{jt} = I_{jt} \quad \forall j \in CL, t \in T \quad (3.3)$$

Quantidades recebidas (4.4). Esta restrição determina para cada cliente, em cada período, a quantidade total de mercadoria recebida. O primeiro somatório representa as quantidades enviadas no período anterior com carga FTL e LTL respectivamente, e que devido aos *leads time* de transportes maiores que um período só estão disponíveis para serem usados no período atual. O segundo somatório representa as quantidades enviadas no período atual nos dois modos de transporte e que estão disponíveis para serem usadas nesse mesmo período. Nota-se que as quantidades recebidas pelo cliente podem ser disponibilizadas em simultâneo a partir de diferentes centros de distribuição.

$$Q_{jt} = \sum_{i \in CD} \left((1 - RF_{ij}) \sum_{k \in K} X_{ijkt-1} B_k RM_{ijk} + (1 - RL_{ij}) \sum_{s \in S} Y_{ijst-1} \right) + \sum_{i \in CD} \left(RF_{ij} \sum_{k \in K} X_{ijkt} B_k RM_{ijk} + RL_{ij} \sum_{s \in S} Y_{ijst} \right) \quad \forall j \in CL, t \in T \quad (3.4)$$

Assim, as quantidades recebidas pelo cliente são compostas pelas quantidades enviadas e recebidas no mesmo período e pelas quantidades enviadas no período anterior que só estarão disponíveis para serem usadas no período atual, devido ao longo tempo de transporte. Esta restrição considera ainda as limitações de acesso para veículos FTL a partir dos centros de distribuição para clientes localizados em cidades com restrição de veículos de grande tamanho. O parâmetro RM_{ijk} restringe os tipos de veículos não permitidos para atender a cada cliente.

Capacidade dos centros de distribuição (3.5). Garante que a quantidade de mercadoria total enviada a partir de cada CD deve ser inferior a uma capacidade por período, definida pelas limitações da instalação e pelas políticas da organização.

$$\sum_{j \in CL} \left(\sum_{k \in K} (X_{ijkt} B_k R M_{ijk}) + \sum_{s \in S} Y_{ijst} \right) \leq P_i \quad \forall i \in CD, t \in T \quad (3.5)$$

Capacidade de armazenagens dos clientes (3.6). Esta restrição limita as quantidades mantidas no cliente dada a sua capacidade de armazenamento. O estoque de segurança mais o inventário inicial e as quantidades recebidas no período devem ser inferiores à capacidade.

$$\overline{SS}_j + I_{jt-1} + Q_{jt} \leq G_j \quad \forall j \in CL, t \in T \quad (3.6)$$

A Figura 4.5 ilustra a restrição de capacidade de armazenagens para os clientes. A linha horizontal representa a capacidade para um cliente em particular. Para qualquer instante no período, a soma do estoque de segurança e estoque regular deve ser inferior à capacidade. Para o segundo período da Figura 3.5, por exemplo, esta condição não é satisfeita.

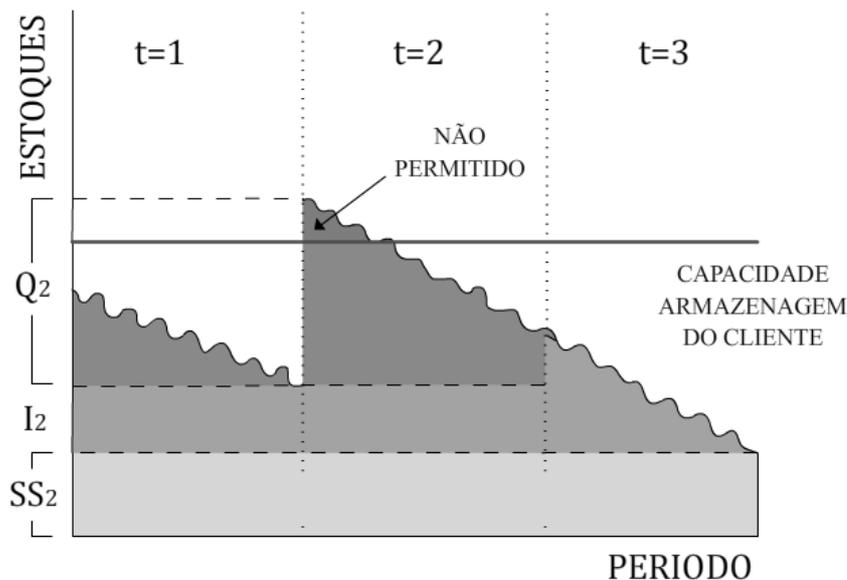


Figura 3.5 - Restrição capacidade de armazenagens dos clientes

Cálculo do estoque de segurança (3.7). Determina o nível de estoque de segurança para cada cliente como uma média dos estoques de segurança determinados em cada período. As quantidades enviadas ou o modo de transporte de carga usado em cada período para satisfazer a demanda do cliente podem variar, mas é de caráter estratégico manter o mesmo nível de estoque de segurança durante todo o horizonte de planejamento. Portanto estima-se esta quantidade como um valor médio dos estoques de segurança definidos para cada período (3.8) e (3.9).

$$\overline{SS}_j = \frac{1}{T} \sum_{t \in T} SS_{jt} \quad \forall j \in CL \quad (3.7)$$

Cálculo do estoque de segurança para cada período (3.8) e (3.9). Estas restrições determinam os níveis de estoque de segurança para cada cliente em cada período em função dos *leads time* de atendimento, da demanda diária e dos desvios padrão destes parâmetros, como foi apresentado na equação (3.1). As restrições (3.8) e (3.9) em conjunto determinam o máximo dos estoques de segurança que devem ser mantido no período caso diferentes tipos de carga sejam utilizadas, ou caso o cliente seja atendido desde diferentes centros de distribuição. Nota-se que enquanto os parâmetros estão incluídos na raiz, as variáveis de decisão são situadas fora, ativando as restrições, para evitar representações não lineares.

$$SS_{jt} \geq \phi_\alpha W_{ijkt} \sqrt{LF_{ij}(\sigma Dd_j)^2 + (Dd_j \sigma LF_{ij})^2} \quad \forall i \in CD, j \in CL, k \in K, t \in T \quad (3.8)$$

$$SS_{jt} \geq \phi_\alpha Z_{ijst} \sqrt{LL_{ij}(\sigma Dd_j)^2 + (Dd_j \sigma LL_{ij})^2} \quad \forall i \in CD, j \in CL, s \in S, t \in T \quad (3.9)$$

Garantia de uso de veículo FTL (4.10). Garante que o veículo seja usado caso alguma quantidade seja atribuída para ele. Esta restrição faz $W_{ijkt} = 1$ quando o veículo é utilizado no período, desde o centro de distribuição especificado e para o cliente especificado. Note que, a restrição (3.8) utiliza esta variável binária para o cálculo do estoque de segurança.

$$X_{ijkt} \leq W_{ijkt} M \quad \forall i \in CD, j \in CL, k \in K, t \in T \quad (3.10)$$

Garantia de uso de carga LTL (3.11). Relaciona as variáveis de quantidade de carga LTL com as variáveis binárias que indicam a utilização deste tipo de transporte de carga. Esta restrição faz $Z_{ijst} = 1$ quando carregamento LTL é utilizado no período, desde o CD e para o cliente especificado. Note que, a restrição (3.9) utiliza a variável binária para o cálculo do estoque de segurança.

$$Y_{ijst} \leq Z_{ijst} M \quad \forall i \in CD, j \in CL, s \in S, t \in T \quad (3.11)$$

Garantia de carga mínima por faixa de desconto (3.12). Garante que a quantidade transportada com carga LTL esteja alocada a uma única faixa de custo. A quantidade

transportada dentro da faixa deve ser maior à quantidade mínima requerida (*breakpoint*) para que o custo seja aplicado.

$$p_s Z_{ijst} \leq Y_{ijst} \quad \forall i \in CD, j \in CL, s \in S, t \in T \quad (3.12)$$

O conjunto de restrições (3.13) - (3.15), refere-se ao domínio das variáveis de decisão.

$$X_{ijkt} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in CD, j \in CL, k \in K, t \in T \quad (3.13)$$

$$W_{ijkt}, Z_{ijst} \in \{0,1\} \quad \forall i \in CD, j \in CL, s \in S, k \in K, t \in T \quad (3.14)$$

$$Y_{ijst}, Q_{jt}, I_{jt}, SS_{jt}, \overline{SS}_j \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in CD, j \in CL, s \in S, t \in T \quad (3.15)$$

Se a condição $I_{j0} \neq 0, \forall j \in CL$ não for imposta, o modelo pode ser infactível para um exemplar de dados. Especificamente para os casos onde clientes estejam suficientemente longe dos CD, de forma que o *lead time* das alternativas de transporte sejam maiores a um período. Para evitar tal infactibilidade podem ser definidos valores $I_{j0} \geq D_{j1} \forall j \in CL$ sobre a consideração de que o planejamento é realizado sobre uma rede de distribuição em andamento.

As equações (3.16), (3.17) e (3.18) apresentam o número de variáveis contínuas, variáveis inteiras (binárias) e o número de restrições para a formulação proposta. Particularmente, nota-se que o número de variáveis e restrições aumenta de forma considerável conforme aumenta o número de clientes considerados.

$$\text{Variáveis Contínuas} = |CL| \times (2|T| + |CD||S||T| + 1) \quad (3.16)$$

$$\text{Variáveis Inteiras} = |CD||CL||T| \times (2|K| + |S|) \quad (3.17)$$

$$\text{Numero de restrições} = |CD||CL||T| \times (3|S| + 2|K|) + |CL| \times (3|T| + 1) \quad (3.18)$$

3.3 Estudos computacionais

O modelo apresentado na seção anterior foi usado para resolver um problema real de uma empresa do setor de telecomunicações. O sistema de distribuição analisado é composto por 70 armazéns regionais e dois CDs centrais, localizados em território brasileiro. Uma frota heterogênea de veículos FTL foi considerada para a distribuição, com capacidades de $90m^3$, $36m^3$, $12m^3$, $6m^3$ e $4m^3$. Dada a pouca densidade dos produtos carregados (antenas, decodificadores, receptores, etc.), a capacidade dos veículos foi definida em função do volume e o peso não representou uma limitação. O horizonte de planejamento foi definido em

26 semanas considerando as longas distâncias entre cada arco de origem-destino e o caráter tático do problema.

Os exemplares testados nos estudos computacionais consistem em informações reais do sistema de distribuição. No entanto, os dados foram proporcionalmente modificados e alguns simulados para proteger a confidencialidade da empresa. Foram coletados os seguintes dados: demanda média semanal dos CD regionais (clientes); tempos esperados de atendimento com as alternativas de transporte de carga (FTL e LTL); capacidade dos veículos FTL disponíveis; demanda diária esperada para cada CD regional; níveis de estoque inicial dos CD regionais; estimativa da capacidade máxima de distribuição de um grande centro; estimativa da porcentagem de variação do tempo de atendimento para cada modo de transporte; estimativa do desvio padrão da demanda diária; restrições de acesso de veículos para os CD regionais; nível de serviço desejado. Em relação aos custos, foram obtidas informações sobre o custo de manutenção de estoque mensal em cada cliente, custos de transporte FTL em função do veículo e a distância; a estrutura de custo com descontos para as cargas LTL em função da quantidade transportada e a distância, e informações sobre o valor dos estoques. A partir destas informações foram estimados os custos de manutenção de estoque em trânsito para cada cliente, as capacidades de armazenagem dos CD regionais e os desvios padrão das demandas e tempos de atendimento. O Anexo A apresenta os dados para os estudos computacionais.

Os estudos computacionais realizados são apresentados em três subseções. A primeira subseção refere-se aos resultados do modelo para o exemplar real (cenário de referência). A segunda subseção apresenta uma análise sobre variações nos parâmetros para verificar o comportamento do modelo em situações de interesse. Por fim, a terceira subseção apresenta uma análise sobre o comportamento do modelo frente a mudanças na função objetivo. O último estudo permite ressaltar a relevância da integração das decisões no modelo proposto.

Todos os experimentos computacionais foram realizados em um computador com processador Intel Core i7-2600, 3.40GHz e 16 GB de memória RAM, programados na linguagem de programação matemática GAMS (*Generic Algebraic Modeling System*) e resolvidos através do *solver* CPLEX versão 12.5.1.0.

3.3.1 Análises da instância real

A aplicação do modelo a uma instancia real resultou em um problema com 85.663 restrições e 63.771 variáveis, das quais 47.320 são binárias. O valor da função objetivo (Custo total) da solução incumbente e o melhor limitante inferior após uma hora de resolução foram

R\$4.891.204,49 e R\$4.845.536,50 respectivamente, indicando um *gap* de 0,93%. Para esta instância, um *gap* menor a 5% foi obtido a partir dos primeiros 222,85 segundos de processamento. Isto sugere pelo menos para este caso, que o modelo encontra boas soluções nos primeiros minutos de execução.

Em relação ao *gap* indicado pelo CPLEX, este corresponde à diferença percentual entre o valor objetivo da solução encontrada (*Best Found –BF*) e a melhor solução inteira possível ou limitante inferior (*Best Possible –BP*). Desta forma, o *gap* utilizado indica quão distante encontra-se a solução incumbente da melhor solução inteira possível, com base no valor da função objetivo da solução do exemplar considerada (Equação 3.20).

$$gap = \frac{|BF - BP|}{1^{-10} + |BF|} \quad (3.20)$$

A figura 3.6 apresenta os custos considerados do sistema de distribuição. Enquanto custos associados ao estoque (custos de manutenção de estoque regular- CMS, de estoque em trânsito- CST e de estoque de segurança- CSS) representam 57,3% dos custos totais, os relacionados ao transporte implicam o 42,7% restante. Fretes de carga completa (CFTL) e fracionada (CLTL) representam 7,7% e 34,9% dos custos totais respectivamente.

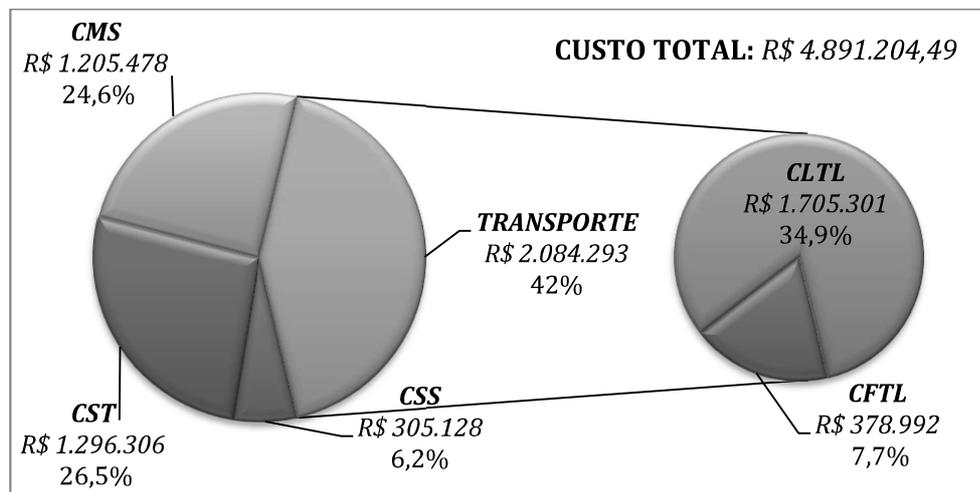


Figura 3.6 - Custos associados: Instância real

A Figura 3.7 ilustra a distribuição da carga entre os modos de transporte disponíveis. Nesta solução o 83,6% da demanda foi satisfeita através de carga LTL. Com relação à carga FTL, 12% foi transportado através de veículos com capacidade de 36m³ e 5% através de veículos com capacidade de 90m³. Veículos pequenos não foram utilizados.

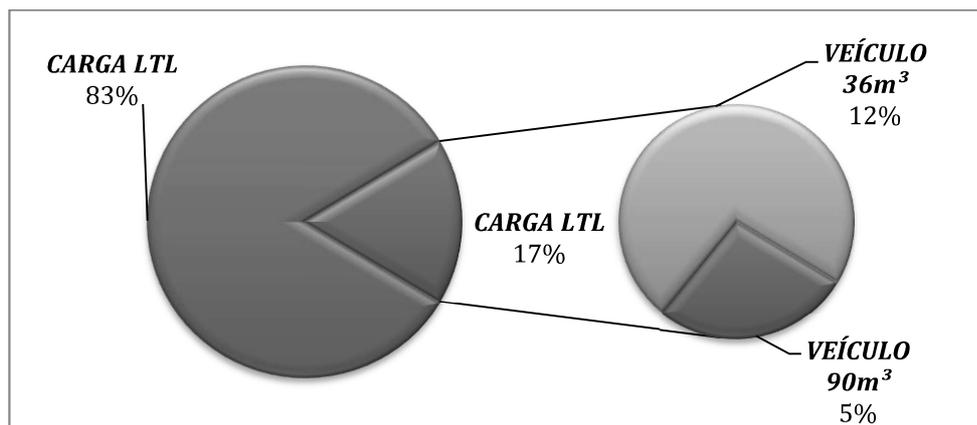


Figura 3.7 - Distribuição da carga: Instância real

Com relação à alocação dos clientes para os respectivos CDs, como mostrado na Tabela 3.1, a maior parte deles foi atendida por um único centro de distribuição mesmo quando o modelo não restringe a opção de atendimento simultâneo. Como exemplo, os clientes 1-7 foram alocados para o CD2 (localizado em um estado do nordeste Brasileiro) e os clientes 31-35 foram alocados ao CD1 (localizado

na região sudeste). Estas atribuições mostram-se razoáveis, pois os clientes 1-7 encontram-se na região norte e nordeste do Brasil, enquanto os clientes 31-35 estão localizados na região sudeste.

Tabela 3.1 - Alocação de clientes aos CD: Instância real

CL	CD1	CD2									
1		X	19		X	37	X		55	X	
2		X	20		X	38	X	X	56	X	
3		X	21		X	39	X	X	57	X	X
4		X	22	X		40		X	58	X	X
5		X	23		X	41	X		59	X	X
6		X	24	X		42	X		60	X	
7		X	25		X	43	X		61	XX	XX
8	X		26		X	44		X	62	XX	XX
9	X		27		X	45	X		63	X	
10		X	28	X	X	46		X	64	X	
11	X	X	29	X	X	47	X		65	X	
12		X	30	X	X	48	X	X	66		X
13	X		31	X		49	X		67	X	X
14		X	32	X		50	X	X	68	X	
15	X		33	X		51	X		69	X	
16		X	34	X		52	X		70		X
17		X	35	X		53	X	X			
18		X	36		X	54	X				

Alguns casos, como os clientes 11, 28-30, 57,61 e 62 (localizados ao norte da região sudeste) foram servidos por ambos CD em períodos diferentes. Os clientes 61 e 62 foram atendidos por ambos os centros de distribuição no mesmo período. Atendimentos simultâneos podem ser explicados devido às distâncias similares do CL com os CD e às capacidades restritas dos centros de distribuição durante cada período.

A Tabela 3.2 apresenta o planejamento detalhado para o cliente 61, que difere dos outros. As quantidades enviadas (coluna 7) representam a soma das quantidades despachadas desde os CD através de qualquer tipo de carga para o cliente. As quantidades recebidas (coluna 8) levam em conta o *lead time* de cada carga, desde cada CD, para definir se as quantidades enviadas estarão, ou não, disponíveis no mesmo período. A quantidade disponível (coluna 9) representa a soma do inventário inicial (coluna 6) e as quantidades recebidas. Finalmente o inventário final (coluna 11) é a diferença entre as quantidades disponíveis e a demanda do período (coluna 10).

Tabela 3.2 - Planejamento da distribuição e política de estoque para o cliente 61: Instância real

PER	CD	Veículo [Nº]	FTL (m³)	LTL (m³)	INV. INICIAL (m³)	QUANT. ENV. (m³)	QUANT. REC. (m³)	DISP. (m³)	DEM. (m³)	INV. FINAL (m³)	SS (m³)
1					17	-	-	17	13	4	-
2	2			1	4	1	1	5	5	-	1,989
3	1			18	-	18	18	18	18	-	1,989
4	1			11	-	11	11	11	11	-	1,989
5	1			4	-	4	4	4	4	-	1,989
6	1			25	-	25	25	25	23	2	1,989
7					2	-	-	2	2	-	-
8	2			6	-	6	6	6	6	-	1,989
9	1+2			3+1	-	4	4	4	4	-	1,989
10	1	2[1]	36		-	36	36	36	24	12	0,685
11	1			5	12	5	5	17	16	1	1,989
12					1	-	-	1	1	-	-
13	1			12	-	12	12	12	10	2	1,989
14					2	-	-	2	2	-	-
15	1			3	-	3	3	3	3	-	1,989
16	1	2[1]	36		-	36	36	36	16	20	0,685
17					20	-	-	20	19	1	-
18	1			10	1	10	10	11	10	1	1,989
19	2			11	1	11	11	12	12	-	1,989
20	2			6	-	6	6	6	6	-	1,989
21	2	2[1]	36		-	36	36	36	24	12	0,685
22					12	-	-	12	5	7	-
23					7	-	-	7	3	4	-
24	1			10	4	10	10	14	13	1	1,989
25	1			13	1	13	13	14	14	-	1,989
26	1			21	-	21	21	21	21	-	1,989
					SOMA	268	268	MÉDIA	10,96	2,58	1,303

Observa-se na Tabela 3.2 que no período 9 foram enviados $3 m^3$ e $1 m^3$ como carga LTL a partir do CD1 e CD2 respectivamente. Como o cliente 61 está localizado de forma que pode ser atendido com carga LTL desde ambos os CD1 e CD2 em menos de uma semana, na coluna “quantidades recebidas” são acumuladas as quantidades despachadas desde ambos os CD no mesmo período.

As quantidades SS (coluna 12) representam os estoques de segurança como determinados para cada período. Determina-se o estoque de segurança sugerido para o cliente como uma média dos estoques de segurança de todos os períodos. Para o período 3 ainda na Tabela 3.2, existe um envio com carga LTL desde o CD1 ($\bar{x}_{1,61} = 5$, $\sigma_{1,61} = 2,4$ dias em trânsito). Portanto, o estoque de segurança deste período foi calculado com base nesses valores e usando a fórmula definida no modelo (3.1). Para os períodos onde existem entregas simultâneas, toma-se o valor que sugere maior nível de estoque. Finalmente o estoque de segurança sugerido para o cliente 61 durante o horizonte de planejamento foi $1,303 m^3$, definido como uma média dos estoques em cada período.

Com base na informação apresentada neste estudo e no conhecimento do sistema, a solução gerada pelo modelo foi avaliada com objetivo de avaliar sua viabilidade e aceitabilidade. Assim sendo, esta solução correspondeu a uma solução viável e fez sentido em termos de grandeza dos custos.

3.3.2 Análises das variações nos parâmetros

A Tabela 3.3 apresenta o resumo experimental para alguns cenários nos quais variações nos parâmetros foram realizadas com tempo limite de execução de 3600 segundo por experimento. O *gap* médio para os experimentos foi de 1,08%. A Tabela 3.4 apresenta o resumo dos experimentos para um *gap* de 5%. Neste caso, o tempo médio de execução foi de 235,2 segundos. Isto indicou previamente que o modelo alcança boas soluções rapidamente (*gap* baixos) e depois consome um tempo considerável tentando melhorar o limitante inferior do problema.

A Tabela 3.3 (experimentos 1-5) apresenta os resultados para os quais diferentes valores do nível de serviço (70%, 75%, 80%, 85% e 90%) foram examinados. O experimento 3 representa o cenário descrito na seção anterior, no qual o nível de serviço foi definido como 80%.

Os experimentos 6-10 referem-se às mudanças do desvio padrão da demanda diária (σDd) desde $\pm 30\%$ até $\pm 70\%$. O experimento 8, por exemplo, representa o caso onde o desvio padrão da demanda foi $\pm 50\%$ da média da demanda diária para cada cliente.

Experimentos 11-15 e 16-20 referem-se às mudanças do desvio padrão dos tempos de atendimento para carga completa e fracionada respectivamente. Os valores de desvio padrão do *lead time* foram alterados desde $\pm 10\%$ até $\pm 50\%$ para a carga completa e desde $\pm 20\%$ até $\pm 100\%$ para a carga fracionada. Estas variações apoiam-se na suposição de que cargas LTL geralmente implicam maiores desvios no tempo de atendimento do que as cargas FTL.

Experimentos 21-27 referem-se a variações nos custos de transporte FTL desde incrementos de 20% até descontos do mesmo valor. O experimento 26, por exemplo, refere-se ao caso onde todos os fretes FTL foram reduzidos em 10% do seu valor normal.

Os experimentos 28-31 tratam sobre as restrições de acesso dos veículos às grandes cidades. Consideram-se os casos onde nenhum veículo é restrito, onde veículos de 90 m^3 não estão disponíveis, veículos maiores ou iguais a 36 m^3 são restritos e unicamente veículos menores de 6 m^3 estão disponíveis para a distribuição.

Por fim, os experimentos 32-35 estudam o comportamento do modelo para mudanças na demanda dos clientes, enquanto os desvios padrão permanecem constantes. Apresentam-se os resultados quando a demanda varia desde 70% até 130% do valor médio. Os resultados obtidos em base a cada experimento são apresentados após as Tabelas 3.3 e 3.4.

EXPERIMENTOS	Nº	VALOR	CFTL	CLTL	CSS	CST	CMS	CTOTAL	%FTL	%LTL	SS/CL	GAP
VARIAÇÃO NO NÍVEL DE SERVIÇO AO CLIENTE	1	70%	363.525	1.720.164	197.468	1.302.403	1.189.003	4.772.563	16,60%	83,40%	1,13	0,56%
	2	75%	366.441	1.716.796	252.075	1.301.113	1.189.003	4.825.427	16,80%	83,20%	1,45	0,62%
	3	80%	378.992	1.705.301	305.128	1.296.306	1.205.478	4.891.204	17,20%	82,81%	1,76	0,93%
	4	85%	393.703	1.690.754	364.221	1.290.703	1.223.902	4.963.284	17,90%	82,10%	2,12	1,18%
	5	90%	413.210	1.674.260	430.089	1.282.794	1.245.959	5.046.312	18,31%	81,70%	2,53	1,43%
VARIAÇÃO NO DESVIO PADRÃO DA DEMANDA DIÁRIA	6	30%	378.992	1.705.804	266.840	1.296.325	1.201.133	4.849.093	17,20%	82,81%	1,51	0,86%
	7	40%	378.992	1.705.513	282.539	1.296.325	1.203.115	4.866.484	17,20%	82,81%	1,62	0,87%
	8	50%	378.992	1.705.212	304.814	1.296.306	1.205.937	4.891.261	17,20%	82,81%	1,76	0,93%
	9	60%	381.908	1.702.249	323.419	1.295.021	1.209.865	4.912.461	17,34%	82,67%	1,89	1,04%
	10	70%	375.366	1.708.500	347.173	1.295.908	1.212.091	4.939.038	16,99%	83,01%	2,04	1,09%
VARIAÇÃO NO DESVIO PADRÃO DO LEAD TIME FTL	11	20%	378.992	1.705.604	305.797	1.296.522	1.205.802	4.892.716	17,20%	82,81%	1,77	0,93%
	12	40%	372.449	1.711.349	310.195	1.296.924	1.206.006	4.896.923	16,85%	83,15%	1,80	0,96%
	13	60%	349.049	1.733.068	315.626	1.307.858	1.196.809	4.902.411	16,09%	83,92%	1,84	0,94%
	14	80%	346.813	1.736.235	319.694	1.302.676	1.201.693	4.907.111	15,74%	84,26%	1,87	0,90%
	15	100%	355.863	1.727.734	326.194	1.305.692	1.197.869	4.913.352	16,30%	83,71%	1,92	0,97%
VARIAÇÃO DO DESVIO PADRÃO DO LEAD TIME LTL	16	60%	401.675	1.685.642	383.297	1.285.521	1.232.853	4.988.988	17,96%	82,04%	2,21	1,33%
	17	80%	446.245	1.640.926	452.718	1.271.509	1.273.629	5.085.027	19,91%	80,10%	2,62	1,72%
	18	100%	489.170	1.610.337	521.606	1.257.454	1.301.993	5.180.560	20,81%	79,20%	3,01	2,07%
	19	120%	536.622	1.568.353	576.776	1.243.705	1.343.738	5.269.193	22,50%	77,52%	3,34	2,58%
	20	140%	588.164	1.537.169	637.525	1.226.193	1.389.928	5.378.979	23,42%	76,60%	3,74	3,41%
	21	-20%	277.158	1.843.187	312.195	1.339.529	1.178.216	4.950.286	10,61%	89,40%	1,83	0,61%
	22	-10%	298.531	1.805.880	309.057	1.321.673	1.190.224	4.925.365	12,21%	87,80%	1,81	0,75%
	23	-5%	361.092	1.738.523	306.239	1.304.188	1.199.413	4.909.456	15,61%	84,40%	1,78	0,81%
	24	0%	378.992	1.705.372	305.128	1.296.261	1.205.478	4.891.230	17,20%	82,81%	1,76	0,93%
	25	5%	391.418	1.675.296	301.469	1.284.681	1.219.998	4.872.863	18,66%	81,35%	1,74	1,06%
	26	10%	461.071	1.587.164	295.203	1.258.129	1.248.068	4.849.635	22,47%	77,54%	1,69	1,21%
	27	20%	502.506	1.496.845	288.053	1.225.818	1.281.723	4.794.944	25,57%	74,44%	1,66	1,52%
	28	-	378.992	1.705.301	305.128	1.296.306	1.205.478	4.891.204	17,20%	82,81%	1,76	0,93%
	29	V1	257.005	1.847.791	310.489	1.330.065	1.186.089	4.931.439	9,71%	90,30%	1,82	0,41%
	30	V1-V2	-	2.088.941	332.509	1.466.583	1.118.139	5.006.172	0,00%	100,00%	1,93	0,09%
	31	V1-2-3	-	2.088.661	332.962	1.466.885	1.117.698	5.006.206	0,00%	100,00%	1,93	0,10%
	32	70%	168.217	1.314.642	294.100	941.566	875.913	3.594.437	10,96%	89,04%	1,71	1,12%
	33	90%	338.481	1.550.873	299.543	1.169.189	1.114.204	4.472.290	17,06%	82,97%	1,74	1,10%
	34	100%	381.908	1.702.533	304.997	1.295.089	1.206.834	4.891.361	17,34%	82,67%	1,76	0,94%
	35	110%	426.961	1.860.913	310.671	1.417.683	1.313.478	5.329.706	17,51%	82,50%	1,80	0,95%

Tabela 3.3 – Síntese dos experimentos computacionais: Tempo limite 3600 seg.

EXPERIMENTOS	Nº	VALOR	CFTL	CLTL	CSS	CST	CMS	CTOTAL	% FTL	% LTL	SS/CL	TEMPO
VARIAÇÃO NO NÍVEL DE SERVIÇO AO CLIENTE	1	70%	402.042	1.685.629	181.950	1.289.293	1.407.390	4.966.304	18,17%	81,85%	1,040	131,90
	2	75%	377.231	1.712.608	239.224	1.300.023	1.415.332	5.044.418	16,93%	83,11%	1,360	209,30
	3	80%	421.483	1.666.008	288.293	1.293.755	1.387.855	5.057.393	19,44%	80,61%	1,650	238,70
	4	85%	471.524	1.634.338	345.061	1.278.734	1.425.692	5.155.349	20,78%	79,37%	1,970	230,90
	5	90%	469.371	1.636.829	424.622	1.269.249	1.387.883	5.187.955	20,24%	79,84%	2,490	280,00
VARIAÇÃO NO DESVIO PADRÃO DA DEMANDA DIÁRIA	6	30%	376.806	1.714.544	256.476	1.305.074	1.398.595	5.051.495	17,29%	82,71%	1,450	226,20
	7	40%	391.685	1.707.277	270.332	1.300.188	1.393.702	5.063.184	17,40%	82,60%	1,539	190,23
	8	50%	421.483	1.666.008	288.293	1.293.755	1.387.855	5.057.393	19,44%	80,61%	1,650	222,20
	9	60%	401.619	1.689.655	305.893	1.294.229	1.417.782	5.109.177	17,85%	82,18%	1,790	232,70
	10	70%	409.653	1.691.514	335.642	1.293.050	1.385.197	5.115.055	18,43%	81,61%	1,940	223,20
VARIAÇÃO NO DESVIO PADRÃO DO LEAD TIME FTL	11	20%	381.273	1.719.979	292.588	1.306.520	1.392.564	5.092.923	16,52%	83,55%	1,690	237,00
	12	40%	408.071	1.692.526	300.921	1.302.965	1.344.217	5.048.700	18,59%	81,45%	1,720	218,50
	13	60%	368.820	1.718.803	304.632	1.304.622	1.365.084	5.061.960	16,78%	83,23%	1,760	66,20
	14	80%	314.932	1.771.426	309.044	1.311.294	1.362.875	5.069.571	13,87%	86,14%	1,800	92,50
	15	100%	341.492	1.746.886	316.948	1.321.713	1.353.758	5.080.797	15,81%	84,46%	1,870	246,50
VARIAÇÃO DO DESVIO PADRÃO DO LEAD TIME LTL	16	60%	482.267	1.625.691	368.999	1.268.475	1.394.817	5.140.249	20,74%	79,45%	2,110	313,00
	17	80%	519.700	1.592.350	430.583	1.243.386	1.468.467	5.254.486	21,33%	78,70%	2,500	297,40
	18	100%	563.186	1.565.680	510.413	1.243.149	1.438.089	5.320.517	22,73%	77,32%	2,920	336,80
	19	120%	642.738	1.501.566	546.405	1.218.570	1.485.115	5.394.395	25,03%	75,09%	3,190	409,20
	20	140%	623.987	1.526.120	635.148	1.225.210	1.455.540	5.466.005	23,94%	76,09%	3,700	982,30
	21	-20%	310.130	1.817.423	296.378	1.331.035	1.381.888	5.136.854	11,37%	88,66%	1,720	128,70
	22	-10%	337.723	1.778.757	292.315	1.312.506	1.412.060	5.133.362	13,46%	86,62%	1,690	142,10
DESCONTO NO CUSTO DEDICADO	23	-5%	390.119	1.715.927	295.935	1.304.733	1.325.803	5.032.515	17,13%	82,88%	1,700	230,90
	24	0%	421.483	1.666.008	288.293	1.293.755	1.387.855	5.057.393	19,44%	80,61%	1,650	223,40
	25	5%	474.432	1.592.677	274.847	1.254.213	1.451.697	5.047.867	22,06%	78,07%	1,570	159,90
	26	10%	446.643	1.609.587	289.775	1.269.243	1.361.325	4.976.573	21,27%	78,84%	1,670	314,00
	27	20%	564.220	1.458.013	271.512	1.212.818	1.423.483	4.930.046	26,93%	73,27%	1,560	398,10
RESTRICÇÕES DE VEÍCULOS FTL	28	-	421.483	1.666.008	288.293	1.293.755	1.387.855	5.057.393	19,44%	80,61%	1,650	223,40
	29	V1	268.255	1.836.367	293.840	1.326.432	1.419.423	5.144.316	9,99%	90,08%	1,720	48,90
	30	V1-V2	-	2.093.015	318.733	1.471.499	1.297.455	5.180.701	0,00%	100,00%	1,820	13,10
	31	V1-2-3	-	2.094.505	319.974	1.470.483	1.284.443	5.169.405	0,00%	100,04%	1,830	11,50
VARIAÇÃO NA DEMANDA DOS CLIENTES	32	70%	204.562	1.293.150	291.761	935.918	1.012.818	3.738.208	12,65%	87,56%	1,690	216,80
	33	90%	319.789	1.575.708	291.214	1.186.169	1.261.448	4.634.328	16,54%	83,58%	1,660	212,50
	34	100%	421.483	1.666.008	288.293	1.293.755	1.387.855	5.057.393	19,44%	80,61%	1,650	223,20
	35	110%	473.697	1.830.294	296.668	1.427.577	1.523.054	5.551.291	19,26%	80,88%	1,690	300,50

Tabela 3.4 – Sínteses dos experimentos computacionais: gap 5%.

Mudança no nível de serviço (α)

A partir dos resultados, percebe-se que um maior nível de serviço implica um custo total maior para o sistema de distribuição e um aumento significativo no estoque de segurança dos clientes, como ilustrado na Figura 3.8. Na Tabela 3.3 nota-se também um aumento no uso da carga completa pois este modo de transporte implica uma entrega mais rápida e menos variável contribuindo para um melhor nível de serviço.

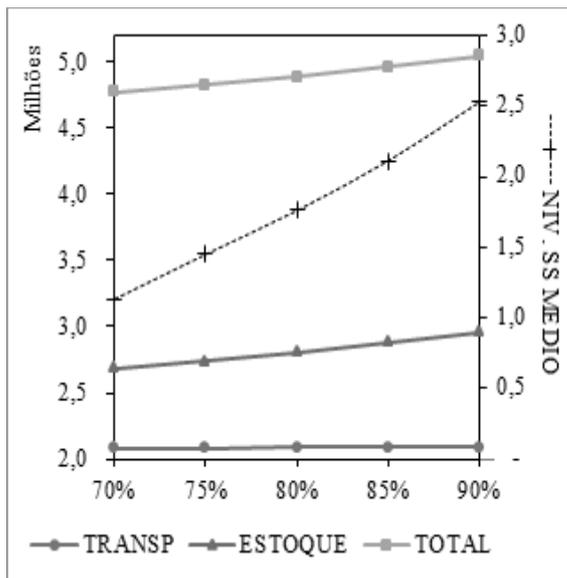


Figura 3.8 - Variação do nível de serviço desejado

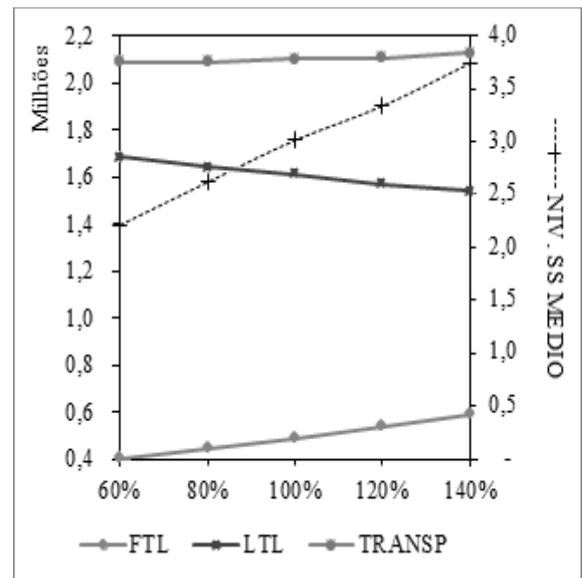


Figura 3.9 - Variação do desvio padrão do Lead Time fracionado

Mudança nos desvios padrão da demanda (σDd) e lead time

A Figura 3.9 ilustra o resultado para as variações do desvio padrão do *lead time* fracionado. Como resultado obtiveram-se aumentos consideráveis nos níveis de estoque de segurança, devido à maior variação das demandas e dos tempos de atendimento. Para os casos em que foi aumentada a variabilidade do tempo de atendimento da carga completa, foi observado um aumento no uso de carga fracionada, e vice-versa.

Mudança no custo de transporte FTL

A Figura 3.10 apresenta os resultados em custos e em relação ao uso dos modos de transporte de carga. Maiores descontos no frete FTL sugerem maior uso deste tipo de carga e menores custos de transporte. Diminuições nos níveis de estoque de segurança foram observadas pelo maior uso de cargas completas.

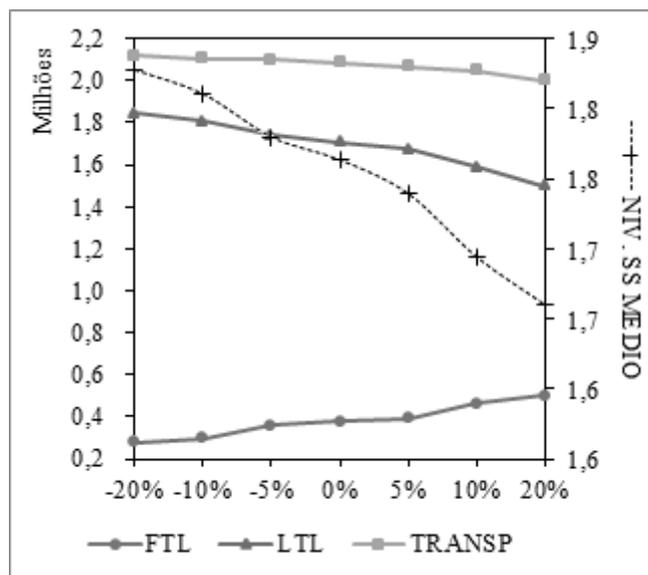


Figura 3.10 - Variação do desconto no frete dedicado

Mudança nas restrições de veículos dedicados

Devido ao aumento dos regulamentos rodoviários foi conveniente analisar o caso onde veículos são restritos por acesso. Os resultados obtidos aqui indicaram que quando os veículos com capacidades de 90m³ e 36m³ não estavam disponíveis, carga completa não foi mais usada. Isto é explicado pela economia de transportar poucas quantidades preferivelmente através de carga LTL em comparação a usar veículos FTL de pouca capacidade. Em consequência aumentos nos estoques de segurança e nos custos totais foram observados.

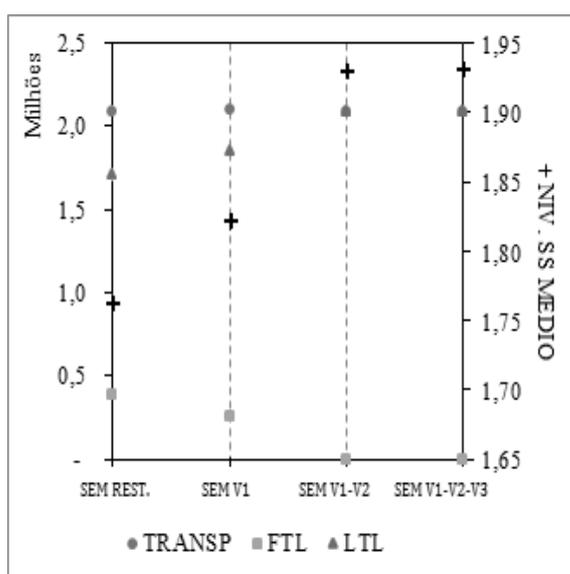


Figura 3.11 - Nível de estoque em função das restrições de veículos dedicados

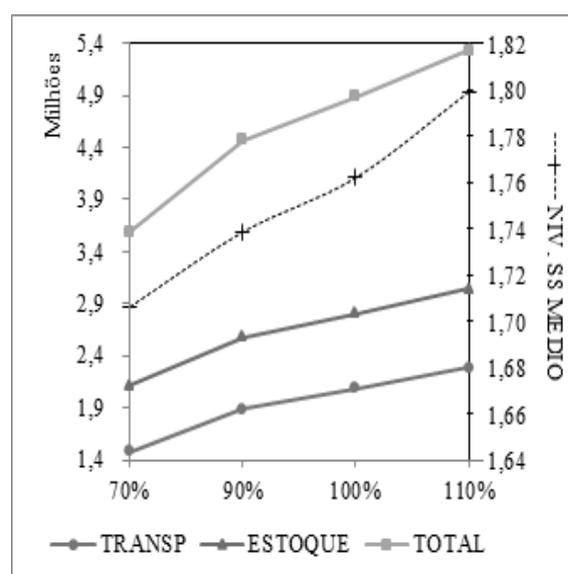


Figura 3.12 - Nível de estoque em função da variação da demanda

Mudança na demanda dos clientes

Aumento na demanda dos clientes tem como resultado incrementos em todos os custos associados, devido a que maiores quantidades são transportadas e mantidas em estoque (Figura 3.12). Devido à economia de escala, observa-se também um aumento no uso de carga FTL em comparação ao uso de carga LTL.

De acordo às informações apresentadas, estes estudos computacionais demonstraram que o modelo proposto é uma representação válida do sistema de distribuição estudado. Além disso, ele fornece boas soluções (*gap* baixos) em tempos de execução aceitáveis para uma empresa (menos de uma hora), considerando o caráter estratégico/tático do problema.

Desde um ponto de vista prático, o modelo pode auxiliar as empresas no estudo de alguns cenários de interesse (aumento da demanda, melhorar o nível de serviço, entre outros).

3.3.3 Análises da função objetivo

A Tabela 3.5 apresenta o resultado dos custos para o mesmo exemplar de dados, mas com diferentes funções objetivo, ou seja, considerando diferentes combinações entre os custos apresentados na função (3.2). As linhas da tabela representam os cenários analisados e as colunas cada um dos custos para os diferentes casos. A coluna CUSTO CENÁRIO representa o valor da função objetivo, enquanto a coluna CUSTO TOTAL considera a soma geral de todos os custos. A coluna Δ CUSTO representa a diferença entre o valor da função objetivo do cenário de referência (apresentado na seção 3.3.1) e cada um dos cenários estudados. Todos os experimentos foram executados com tempo limite de 3600 segundos e o *gap* médio foi de 3,86%. Para alguns casos, o valor ótimo foi obtido (*). No entanto para outros, obteve *gap* muito altos.

O cenário CUSTO* indica o caso onde todos os elementos de custo são incluídos na função objetivo com propósito de minimização. Os casos CFTL*, CLTL*, CSS*, CST* e CMS* otimizaram de forma independente cada custo. O cenário TRANSP* otimizou os custos de transporte conjuntamente para cargas FTL e LTL, enquanto o cenário ESTOQ* otimizou os custos relativos ao estoque de forma conjunta.

Consideram-se também os casos onde cada elemento é desconsiderado. Tal como o cenário SEM-SS* que considerou a otimização de todos os elementos exceto custos de estoque de segurança. Para o cenário SEM-FTL* supõe-se que cargas completas não estão disponíveis, portanto a demanda neste caso deve ser completamente satisfeita através de carga fracionada.

Tabela 3.5 – Resultados das combinações na função objetivo

CENÁRIOS	FTL	LTL	SS	ST	MS	CUSTO CENÁRIO	CUSTO TOTAL	ΔCUSTO	% CARGA FTL	% CARGA LTL	SS MÉDIO	GAP
CUSTO*	378.992	1.705.301	305.128	1.296.306	1.205.478	4.891.204	4.891.204	-	17,20%	82,81%	1,764	0,56%
FTL*	-	2.591.148	122.494	1.746.085	7.570.117	-	12.029.843	7.138.638	0,00%	100,75%	0,770	0,00%*
LTL*	12.404.560	-	37.382.630	1.238.141	8.473.563	-	59.498.894	54.607.690	193,79%	0,00%	1,110	0,00%*
SS*	923.324	845.646	77.187	983.406	8.892.677	2.829.563	11.722.240	6.831.036	48,84%	52,63%	0,574	6,97%
ST*	8.959.995	192.934	98.634	733.520	7.088.702	733.520	17.073.785	12.182.581	85,30%	14,76%	1,073	0,16%
MS*	1.535.833	2.481.496	414.698	1.796.301	1.092.063	1.092.063	7.320.391	2.429.186	9,10%	90,90%	2,505	0,00%*
TRANSP*	652.414	1.012.840	802.127	1.087.989	8.719.037	1.665.254	12.274.407	7.383.202	39,20%	61,80%	1,920	2,88%
ESTOQ*	12.107.853	128.874	174.510	745.628	1.135.771	2.055.909	14.292.637	9.401.432	92,30%	7,73%	1,065	3,73%
SEM-LTL*	-	2.088.969	332.457	1.466.583	1.118.089	5.006.097	5.006.097	114.893	0,00%	100,00%	1,932	0,03%
SEM-FTL*	5.409.156	-	104.113	839.879	2.915.960	9.269.108	9.269.108	4.377.903	101,26%	0,00%	0,703	17,02%
SEM-SS*	355.120	1.727.912	336.607	1.309.621	1.175.716	3.595.354	4.904.975	13.771	16,16%	83,85%	1,963	0,10%
SEM-ST*	53.708	2.003.352	326.968	1.499.239	1.122.694	3.506.722	5.005.961	114.757	3,19%	96,81%	1,915	0,14%
SEM-MS*	923.324	845.646	77.187	983.406	8.892.677	2.829.563	11.722.240	6.831.036	48,84%	52,63%	0,574	6,97%

Alguns resultados interessantes sobre este estudo computacional foram:

- Na otimização dos custos de transporte (TRANSP*), o modelo sugeriu a atribuição do 61,8% da demanda à carga fracionada. Contudo para a otimização dos custos de estoque (ESTOQ*), 92,3% da demanda foi transportada através de carga completa. Isto indica a conveniência do transporte fracionado para aprimorar os custos de transporte, enquanto que para as políticas de estoque o transporte de carga completa é uma melhor alternativa. A causa é basicamente porque carga completa implica menores tempos de atendimento e menor variabilidade, com isso menores custos de estoque podem ser alcançados. Enquanto a carga fracionada é uma alternativa mais econômica de transporte, especialmente para clientes onde veículos de grande capacidade são restritos por acesso.
- Algumas vezes quando são usados veículos FTL, foi observada capacidade ociosa. Considere o cenário SEM-LTL*, por exemplo, onde a porcentagem da carga atribuída para o transporte FTL foi de 101,26%. Deste modo, entende-se que 1,26% da capacidade dos veículos FTL não foi utilizada ou seja, existe capacidade ociosa.
- Para o exemplar de dados considerado, os custos do sistema de distribuição quando cargas fracionadas não estavam disponíveis (SEM LTL)* foram maiores do que os custos do sistema de distribuição sem carga completa (SEM FTL)*. Portanto, se for necessário escolher apenas um dos modos de transporte de carga, o modelo sugere o uso de transporte fracionado (LTL). Porém, considerando o cenário de referência, o uso combinado de ambos os modos de transporte de carga implica economias consideráveis.
- A não consideração de qualquer elemento de custo na função objetivo ou uma gestão individual leva a um planejamento menos eficiente com relação ao caso onde todos os custos são considerados relevantes.

A Figura 3.13 apresenta comparações entre os custos de estoque e transporte em oito dos cenários analisados. Observa-se que enquanto no cenário de referência os custos de transporte e estoque são similares, para as outras situações existem grandes diferenças entre estes dois elementos. Em consequência o custo total no cenário de referencia foi menor.

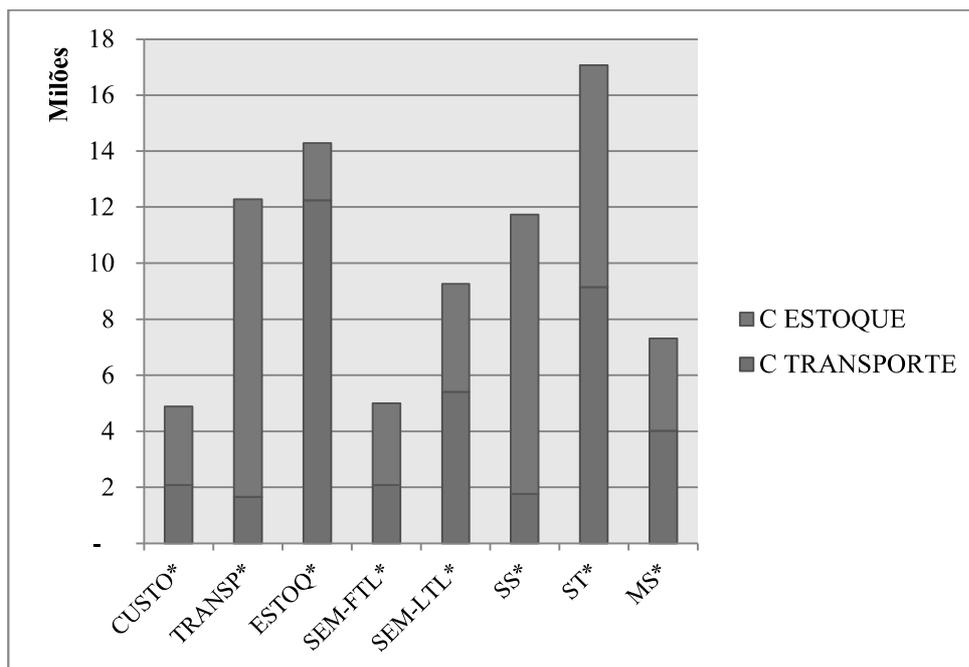


Figura 3.13 - Custos associados ao estoque e transporte nos cenários analisados

Para o cenário que otimizou os custos de transporte TRANSP*, como esperado, obteve-se os menores custos de transporte, em contrapartida os custos de estoque foram os mais elevados. A situação oposta aconteceu para ESTOQ*, nesse caso os custos de transporte foram os mais altos.

A conclusão mais evidente destes resultados é que a otimização de decisões integradas leva a soluções de menor custo e assim a um melhor desempenho em relação à otimização de cada elemento de forma particular. A solução do cenário de referência pode não implicar os custos mais baixos possíveis para cada elemento, mas envolve o menor custo total possível.

De forma geral, os resultados dos estudos computacionais sobre o exemplar e sobre cada experimento considerado mostraram que a formulação proposta é competitiva. Observa-se também que os parâmetros do modelo afetam de forma esperada a configuração das soluções. Finalmente, evidencia-se uma aderência do modelo ao sistema real estudado.

A quantidade de parâmetros, variáveis e critérios não necessariamente quantitativos envolvidos no problema é apreciável. Isto dificulta tratar todos esses elementos ao mesmo tempo e ainda a formulação matemática é incapaz de considerar os critérios de difícil quantificação. A partir dessa consideração, uma metodologia de otimização multicritério foi proposta. A base teórica e conceitual da metodologia pertence à teoria da decisão e será descrita detalhadamente no seguinte capítulo.

4. ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

Em algumas circunstâncias, ajudados por heurísticas simples ou de forma empírica, os decisores fazem escolhas tentando alcançar vários objetivos. Nesses casos, os tomadores de decisões tendem a aceitar o pior desempenho em alguns atributos em troca de um melhor desempenho em outros. Em particular, as heurísticas simples podem levar a decisões rápidas, envolvendo pouca análise, e são muitas vezes bem adaptadas para tarefas específicas quando o tempo é escasso (GIGERENZER; TODD, 1999). Contudo decisões mais estratégicas como o lançamento de um novo produto, localizar um centro de distribuição ou o problema estudado de distribuição de mercadorias, justificam o uso de ferramentas mais elaboradas que permitem um tempo de análises maior. A análise de decisão ajuda aos decisores a usar este tempo de forma eficiente para estruturar e esclarecer seus pensamentos (GOODWIN; WRIGHT, 2005, p. 24).

Este capítulo é dedicado a mostrar como os métodos de análise de decisão podem fornecer benefícios importantes e, portanto, superar algumas limitações na tomada de decisão. Apresentam-se também a técnica simples de avaliação multiatributo (SMART) e o processo de análise hierárquico (AHP) que são fundamentais para a abordagem proposta, assim como aspectos conceituais sobre análise de decisão multicritério e teoria da utilidade.

4.1 Introdução à análise de decisão

Análise de decisão é um esforço para aplicar conceitos da teoria da decisão de forma prática para abordar decisões que envolvem grande quantidade de incerteza e complexas compensações de preferências (HOWARD; MATHESON, 1984; KEENEY; RAIFFA, 1976; VON WINTERFELDT; EDWARDS, 1986). A teoria da decisão está arraigada nos axiomas da teoria da probabilidade (FINETTI, 1937; SAVAGE, 1972 citados por BRADSTTAW e BOOSE, 1990, p. 124) e da teoria da utilidade (VON NEUMANN, MORGENSTERN, 1953). A teoria da probabilidade define padrões para a atribuição de premissas em condições de incerteza, enquanto a teoria da utilidade define como o valor dos resultados pode ser usado para selecionar uma alternativa ideal quando essas premissas são utilizadas na tomada de decisões.

Dito de outra forma, a teoria da probabilidade define aquilo em que um decisor deve acreditar com base na evidência, a teoria da utilidade descreve o que um tomador de decisões quer e a teoria da decisão reúne as duas para sugerir o que o decisor deve fazer (RUSSELL, NORVIG, 2003). Baseado nesta teoria, o responsável pela decisão pode decidir de forma

racional, apoiado nas preferências e desejos em contextos nos quais a incerteza e os objetivos conflitantes o deixam sem meios para decidir.

Infelizmente, o custo e a escassez de conhecimentos de análise de decisão bem como o tempo que normalmente leva à construção e à validação de modelos de decisão formais, têm limitado a sua aplicação às decisões que envolvem grandes quantidades de recursos e tempo (BRADSTTAW; BOOSE, 1990). A seguinte seção tratará sobre a estrutura destes modelos de decisão.

4.1.1 Elementos da decisão

Um modelo de decisão completo –que contem os itens relevantes do conhecimento de resolução de problemas e suas inter-relações– constitui a base da decisão (HOWARD; MATHESON, 1984). Três elementos são necessários para conformar a base de decisão: informação, preferências e alternativas. Eles são definidos conforme Varian (2006) e apresentados na Figura 4.1.



Figura 4.1 - A base de decisão. Fonte: Varian (2006)

Em todo modelo de decisão, os decisores procuram satisfazer um ou vários objetivos. Segundo Keeney e Raiffa (1976) um objetivo é definido como uma indicação da direção preferida de movimentação. Assim, ao afirmar objetivos, pode se usar termos como "minimizar" ou "maximizar". Objetivos típicos podem ser: minimizar os custos e maximizar a participação de mercado. Segundo os mesmos autores, um critério é um aspecto que descreve um objetivo, e um atributo é usado para medir o desempenho de uma alternativa em relação a um objetivo, mas em um sentido operacional.

Considerando, por exemplo, o problema de pesquisa de seleção do modo de transporte de carga, então, o objetivo seria maximizar o desempenho do serviço através das alternativas disponíveis: carga completa ou fracionada. Critérios poderiam ser especificados como custo e benefício, e em um nível mais sutil como custo de transporte, confiabilidade, flexibilidade, entre outros. Um atributo para operacionalizar o critério “confiabilidade” poderia ser “número de bens recebidos sobre o número de bens totais enviados”, e assim por diante. Critérios e atributos são necessários para aferir o grau em que o objetivo foi alcançado.

Por outro lado, as pessoas envolvidas no processo de decisão são, basicamente, o decisor e o analista. O decisor pode ser uma pessoa ou um grupo de pessoas que tem o poder e a responsabilidade para decidir sobre a questão proposta. Quanto mais complexa ou quanto maior o impacto da decisão, é mais provável ter um grupo de decisores. O analista é a pessoa encarregada de modelar o problema de acordo com o método escolhido, através do entendimento claro da questão a ser solucionada. O analista mantém contato constante com o decisor a fim de ajustar o modelo conforme as opiniões do decisor (VARIAN, 2006).

Quando um tomador de decisão tem vários objetivos, a heurística usada pode ser classificada como: compensatória ou não compensatória. Segundo Goodwin e Wright, (2005, p. 16) em uma estratégia compensatória o mau desempenho de uma opção em um critério é compensado pelo bom desempenho dos outros. Por exemplo, a confiabilidade e rapidez de entrega de uma mercadoria podem ser compensadas pelo aumento do custo do serviço logístico. Estratégias não compensatórias envolvem maior esforço cognitivo, pois o tomador de decisão tem a difícil tarefa de fazer *trade-offs* entre o melhor desempenho em alguns critérios e a redução do desempenho dos outros. Algumas heurísticas compensatórias são apresentadas por Goodwin e Wright (2005, p. 16-23), enquanto alguns métodos não compensatórios serão tratados aqui.

Uma vez definidos estes elementos, a base da decisão é estruturada. Alguns métodos para a tomada da decisão têm foco nas alternativas (como o AHP), enquanto outros estão mais focados em objetivos e utilidade (como o SMART), sendo a utilidade uma medida de preferência do decisor.

4.2 Teoria da Utilidade

A teoria da utilidade permite avaliar as consequências das alternativas por meio de um processo de elicitación de preferências que busca incorporar ao problema as escolhas do decisor e seu comportamento em relação ao risco. Esse processo permite criar uma nova escala denominada de “escala de utilidade”. O processo de escolha é então realizado com base

na nova escala que agrega os aspectos de incerteza e preferência inerente ao problema de decisão (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2002).

Segundo Russell e Norvig (2003), a teoria da utilidade fundamenta-se no princípio de utilidade média esperada (UME). Para entender este princípio, considere A e B loterias definidas de modo que:

$A \succ B$ A é preferível a B

$A \sim B$ O decisor é indiferente entre A e B

$A \succeq B$ O decisor prefere A a B ou está indiferente a eles

Uma loteria é uma distribuição de probabilidades sobre um conjunto de resultados gerais. A Figura 3.2 e a equação (4.1) representam uma loteria L , cujos resultados possíveis C_1, \dots, C_n tem probabilidades de ocorrência p_1, \dots, p_n , respectivamente.

$$L = [p_1, C_1; p_2, C_2; \dots p_n, C_n] \quad (4.1)$$

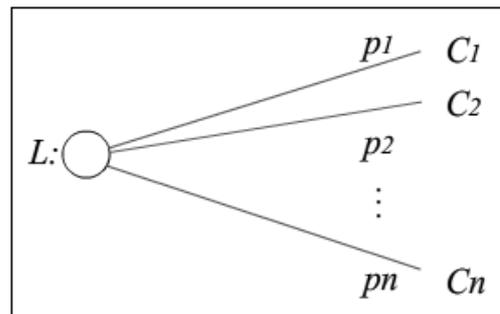


Figura 4.2 - Estrutura de uma loteria. Fonte: Adaptado de Russell e Norvig (2003).

Segundo Russell e Norvig (2003), se as preferências do tomador de decisão obedecem às restrições conhecidas como "axiomas de utilidade" (Apêndice A), então existe uma função de utilidade, nomeada como $u(\cdot)$. Esta função opera sobre resultados tais que $u(A) > u(B)$ se e somente se A é preferível em relação a B , e $u(A) = u(B)$ se e somente se o decisor está indiferente entre A e B , como expressado na equação (4.2).

$$u(A) > u(B) \Leftrightarrow A \succ B;$$

$$u(A) = u(B) \Leftrightarrow A \sim B \quad (4.2)$$

No princípio de utilidade média esperada (UME), a utilidade de uma loteria é o somatório da probabilidade de cada resultado vezes a utilidade desse resultado, da forma:

$$u([p_1, C_1; \dots; p_n, C_n]) = \sum_i p_i u(C_i) \quad (4.3)$$

Em outras palavras, uma vez que as probabilidades e as utilidades dos estados resultantes possíveis são especificadas, a utilidade da loteria fica determinada. Observando as preferências do decisor é possível construir a função de utilidade que representa o que as ações do decisor estão de fato tentando realizar.

Russell e Norvig (2003) descreveram uma função de utilidade como aquela que capta a atitude ao risco e as preferências do decisor entre as alternativas e atribui um único número para expressar a desejo ou preferência. As utilidades de cada alternativa para cada critério são combinadas para assim fornecer uma utilidade esperada referente a cada alternativa.

Vários métodos são utilizados para a derivação de funções de utilidade. Dentro dos mais utilizados, encontram-se a abordagem da probabilidade equivalente (*probability-equivalence approach*), a abordagem de certeza equivalente (*certainty-equivalence approach*) e o método da bissecção, como mostrado em Farquahar (1984) citado em Goodwin e Wright (2005, p. 116). O autor avaliou 24 métodos alternativos diferentes. Devido à comodidade para obter as respostas do decisor através de questionários estruturados, nesta dissertação é usado o método de certeza equivalente. Um exemplo é apresentado no Apêndice B.

4.2.1 Utilidade Multiatributo

A tomada de decisão de nível estratégico, na maioria das vezes, envolve a consideração de mais de um atributo. Considere, por exemplo, a localização de centros de distribuição, onde os custos da localidade, impacto ambiental, incentivos fiscais, entre outros, devem ser geridos simultaneamente para garantir uma localização mais satisfatória (FARAHANI; ASGARI, 2007). O problema de distribuição de carga, por exemplo, envolve outros critérios além do custo e a rapidez, como a cobertura e o acesso, facilidade de fazer mudanças, o controle e a rastreamento, entre outros (ANAYA, 2009). Problemas como esses, em que os resultados são caracterizados por dois ou mais critérios, são manipulados pela teoria da utilidade multiatributos (*Multiple Attribute Utility Theory - MAUT*).

Existem casos nos quais as decisões podem ser tomadas sem combinar os valores dos atributos em um único valor de utilidade, pois uma alternativa pode dominar completamente às outras. Mas encontrar situações deste tipo é pouco comum na engenharia. As alternativas comumente atingem a um conjunto de critérios mais do que a outros, então o decisor tem que analisar as trocas (*trade-off*) entre eles. Desta forma, questões como "que critérios são mais importantes?" ou "que tanto sacrificar de um objetivo para ficar mais perto do outro?" devem ser respondidas, porém não são simples e uma estrutura de decisão bem elaborada tem que ser então utilizada.

O pressuposto básico da teoria da utilidade multiatributo é de que existe uma função de utilidade individual para cada uma dos diferentes atributos ou critérios. Esta função de utilidade é uma agregação, por adição, das utilidades dos critérios envolvidos. Esta função consiste, simplesmente, em uma média ponderada das utilidades individuais (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2002; KEENEY; RAIFFA, 1976).

A forma de definição, se $a(a = 1, 2, \dots, A)$ é o índice que identifica as alternativas e $i(i = 1, 2, \dots, I)$ é o índice que identifica os critérios, então a função de utilidade aditiva tem a forma:

$$U(a) = \sum_{i=1}^I k_i u_i(x_i(a)) \quad (4.4)$$

Onde, $U(a)$ é o valor global da função utilidade da alternativa a ; $x_i(a)$ é o desempenho da alternativa a em relação ao critério i ; $u_i(\cdot)$ é a função de utilidade parcial da alternativa a em relação ao critério i ; e finalmente k_i é o peso do critério i , que se refere ao grau de relevância do critério com relação ao objetivo geral (a soma destas ponderações é 1).

Vários estudos empíricos revelam que modelos aditivos frequentemente fornecem uma excelente aproximação entre a avaliação das pessoas e a estimação da utilidade das alternativas (VON WINTERFELDT; EDWARDS, 1986). Keeney e Raiffa (1976) discutem a condição necessária para a existência de uma representação aditiva das preferências.

4.3 Técnicas de comparação de alternativa sobre vários atributos

Quando tomadores de decisão evitam fazer *trade-offs* entre critérios de um problema, pode levar à seleção de alternativas com bom desempenho para um único critério. Em outros casos, pode levar também à rejeição de alternativas relativamente atraentes porque o seu bom desempenho em vários atributos não é suficiente para compensar o fraco desempenho em outros (GOODWIN; WRIGHT, 2005). Quando um problema complexo é abordado, pode haver informação para lidar simultaneamente de forma não compensatória, assim o tomador de decisão é forçado a usar algoritmos multicritérios a fim de chegar a uma escolha satisfatória. Segundo Gomes, Gomes e Almeida (2002) os algoritmos multicritério podem ser classificados de acordo com a teoria em que se baseiam, sendo as escolas Americana e Francesa os dois mais importantes agrupamentos de métodos analíticos.

Os métodos da Escola Americana, nos quais a teoria da utilidade multiatributo acha-se inserida, alicerçam-se na definição de uma função que designa um valor a cada alternativa, resultado de sua avaliação segundo cada critério. Tais métodos pressupõem ainda que não

existe a incomparabilidade e que existe transitividade nas relações de preferências e de indiferença entre as alternativas (KEENEY; RAIFFA, 1976). Desta forma, os métodos analíticos dessa escola visam à construção de uma medida única de síntese. Destacam-se, dentre eles, a própria teoria da utilidade multiatributo, introduzida por Keeney e Raiffa (1976) e simplificada pelos métodos SMART, SMARTS e SMARTER (EDWARDS; BARRON, 1994), o AHP, que faz uso da construção de uma hierarquia de critérios, introduzido por Saaty e o método ANP (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004). A escola francesa, por sua vez, dispõe de métodos analiticamente mais flexíveis, embora comparativamente mais carentes de uma fundamentação axiomática com a escola americana, aceitando a incomparabilidade entre alternativas e a não existência de transitividade. Entre estes destacam ELECTRE e PROMÉTHÉE (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004).

Para o desenvolvimento desta pesquisa, optou-se pela implementação de métodos da escola americana (AHP e SMART). O AHP é usado por ser um método aceito na literatura e simples, especificamente será usado para atender aos objetivos da etapa de ponderação de critérios. O SMART foi escolhido por ter fundamentação axiomática com base na sólida teoria microeconômica e, portanto, de fácil compreensão. Além, permite a incorporação das funções de utilidade que AHP não considera.

4.3.1 Técnica simples de avaliação multiatributo (SMART)

A técnica SMART foi divulgada por Edwards em 1971. Segundo Goodwin e Wright (2005) devido à simplicidade tanto das respostas necessárias do decisor e a maneira em que estas respostas são analisadas, o SMART tem sido amplamente aplicado. A análise envolvida é clara, portanto, o método é susceptível de produzir uma melhor compreensão do problema e ser aceitável para o tomador de decisão que pode desconfiar de usar uma abordagem matemática mais complexa ou abstrata. Essa razão, juntamente com a velocidade relativa com que o método pode ser aplicado, tem favorecido o uso do SMART como ferramenta para conferências de decisão, onde grupos de decisores se reúnem para considerar complexidades e relaciones conflitantes. A desvantagem do SMART é que precisamente essa simplicidade pode impedir ao método capturar todos os detalhes e complicações do problema real. Por exemplo, a desconsideração de um critério relevante ou a equivocada percepção de um decisor. No entanto, na prática, tem sido demonstrado que a abordagem é extremamente robusta, pois grandes divergências das preferências reais seriam necessárias para levar ao decisor escolher uma alternativa não desejada (BARRON; BARRET, 1996; EDWARDS;

BARRON, 1994; FARAHANI; STEADIESEIFI; ASGARI, 2010; HUANG; KEISLER; LINKOV, 2011).

As principais fases da análise são sucintamente apresentadas aqui através do problema exemplo de localização de um escritório como ilustrado por Goodwin e Wright (2005):

Fase 1: Identificar o decisor (ou decisores) no problema

No exemplo, pode ser o proprietário da empresa ou um grupo de sócios.

Fase 2: Identificar os cursos alternativos de ação

São representados pelos escritórios que o proprietário pode escolher.

Fase 3: Identificar os critérios que são relevantes para o problema de decisão

Uma árvore de valor pode ser útil na identificação de critérios relevantes (Figura 4.3). Os critérios que distinguem os diferentes escritórios podem ser: renda, tamanho e qualidade das condições de trabalho. No entanto, estes fatores iniciais podem ser vagos, portanto, precisam ser divididos em critérios mais específicos, de níveis mais baixos na árvore.

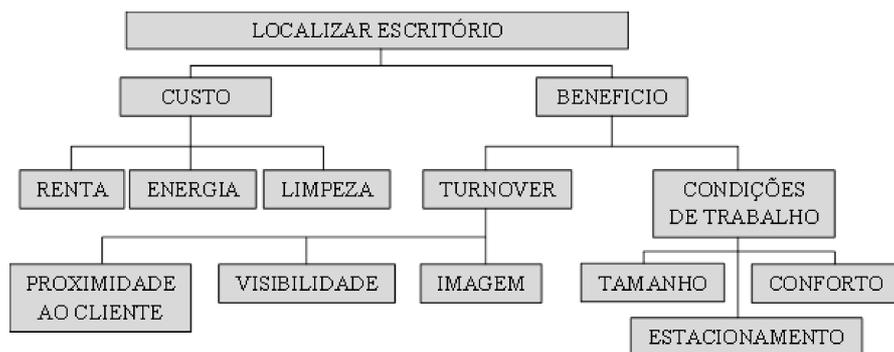


Figura 4.3 - Árvore para o problema de localização de escritório. Fonte: Goodwin e Wright (2005)

O SMART sugere a construção da árvore abordando os critérios que representam os interesses gerais do tomador de decisão. No exemplo do escritório, inicialmente, o proprietário identifica dois fatores principais, que ele decide chamar “custos” e “benefícios”. Não há nenhuma restrição sobre o número de critérios que o tomador de decisão possa especificar inicialmente (por exemplo, o tomador de decisão pode ter especificado “custos de curto prazo”, “os custos em longo prazo”, “conveniência da mudança” e “benefícios”, como seus atributos iniciais).

Após a construção da árvore de valor, Keeney e Raiffa (1976) sugeriram cinco elementos que podem ser utilizados para avaliar a árvore e verificar se é uma representação precisa e útil das preocupações do tomador de decisão. Estas características são:

- **Integralidade.** Todos os critérios que são motivos de preocupação para o tomador de decisão devem ser incluídos na árvore.

- Operacionalidade. Todos os critérios são discriminados o suficiente para que o decisor possa avaliar e compará-los entre as diferentes alternativas.
- Descomponibilidade. O desempenho de uma alternativa sobre um critério tem que ser considerado independentemente do seu desempenho sobre os outros critérios.
- Ausência de redundância. Se dois critérios duplicam-se mutuamente, é porque representam a mesma coisa, então um desses atributos é claramente redundante e deve ser eliminado da árvore. O problema da redundância é que pode levar a uma dupla contagem da relevância de um mesmo critério. Uma forma de identificar redundância é verificar se a decisão seria afetada se um determinado critério for eliminado.
- Tamanho mínimo. Se a árvore é muito grande, qualquer análise significativa pode ser complicada. Para assegurar que isto não aconteça, os atributos não devem ser decompostos para além do nível onde podem ser entendidos e avaliados.

Fase 4: Atribuir valores para medir o desempenho das alternativas em cada atributo

Esta fase objetiva descobrir quão bem as alternativas se desempenham em relação a cada critério da árvore definida. Ao mensurar critérios, a tarefa é mais fácil se for possível identificar indicadores ou atributos objetivos. Por exemplo, o tamanho de um escritório pode ser representado pela sua área útil em metros quadrados (m²). No entanto, para outros critérios, como “imagem” e “conforto” é mais difícil encontrar variáveis que possam quantificá-los. Devido a isso, SMART propõe duas abordagens que podem ser utilizadas para medir o desempenho das alternativas quando os critérios não podem ser representados por variáveis facilmente quantificáveis, a avaliação direta ou a utilização de funções de utilidade.

Na avaliação direta, simplesmente o decisor deve organizar as alternativas em ordem de preferência em relação a um critério, dando um valor de 100 para a alternativa mais preferida e o valor de 0 para aquela alternativa menos preferida. Finalmente o decisor tem que definir valores entre 0 e 100 para as alternativas restantes de tal forma que as diferenças entre os valores representem sua força de preferência para uma alternativa em detrimento de outra. O processo deve ser repetido para cada critério de forma independente. Na avaliação usando funções de utilidade, as preferências do decisor são usadas para construir uma curva. Essa função é utilizada para atribuir valores às alternativas, como apresentado no Apêndice B.

Fase 5: Ponderação dos critérios

Os pesos dos critérios podem refletir o quão importante é o critério em relação a outro para os decisor. Existem diferentes técnicas de atribuição de ponderações, algumas foram

estudadas por Gomes, Gomes e Almeida (2002). A seção 4.3.2 apresenta algumas destas técnicas mais importantes.

Fase 6: Definir valores atribuídos às alternativas

Havendo determinado uma medida de quão bem as alternativas realiza-se em cada critério (Fase 4) e a ponderação de cada critério (Fase 5), pode-se descobrir o quão bem cada alternativa se aproxima do objetivo global. Para fazer isso, o SMART supõe que o modelo aditivo de utilidade multiatributo seja apropriado (seção 3.2.1). No final desta etapa, a alternativa com melhor desempenho global é então definida como alternativa provisória.

Fase 7: Realizar análise de sensibilidade

Permite verificar quão robusta a decisão provisória é em relação às mudanças nos dados fornecidos pelo decisor. Segundo Belton e Stewart (2002), a análise de sensibilidade permite verificar se as conclusões preliminares são suficientemente robustas, ou se são muito sensíveis a determinadas mudanças em variáveis do modelo. Tais mudanças devem ser conduzidas para verificar o impacto de uma possível falta de informação ou, mesmo, até fornecer uma perspectiva diferente ao problema.

4.3.2 Método de ponderação de critérios

A definição das ponderações ou pesos para cada critério reflete a importância de cada critério para o decisor no problema a ser solucionado. Este processo é parte fundamental nos métodos de análise de decisão multicritérios, portanto necessita de atenção especial dos decisores. É extremamente importante conhecer as técnicas de atribuição de ponderações para escolher a mais adequada ao contexto. Segundo GOMES et al. (2002) as seis principais técnicas de atribuição de pesos aos critérios são:

Método *Trade-off Weighting*. O decisor compara duas alternativas que se diferenciam por apenas dois critérios quando os outros critérios são mantidos fixos ou desconsiderados. É realizado um ajuste em um dos critérios até que as alternativas contenham igualdade de preferências (KEENEY; RAIFFA, 1976).

Método de atribuição direta (*Direct Rating*). O decisor é convidado a ordenar de maneira decrescente os critérios (GOODWIN; WRIGHT, 2005). É atribuído o valor 100 para o critério mais relevante e 0 para o menos relevantes, os demais são posicionados pelo decisor entre estes dos critérios. Os valores relativos ao posicionamento de todos os critérios representam a quantificação dos critérios segundo a preferência do tomado de decisões.

Método SMART. Amplamente utilizado por causa da sua simplicidade nas respostas necessárias do decisor e na maneira pela qual estas respostas são analisadas (GOODWIN;

WRIGHT, 2005). Neste método, os critérios são ordenados de forma decrescente sendo atribuído o valor 10 para o critério menos importante. Os critérios restantes são avaliados em relação a este critério e os valores atribuídos devem ser maiores do que 10 e proporcionais à preferência. Após, os pesos são calculados a partir da normalização da pontuação em relação ao total de pontos atribuídos. A Tabela 4.1 exemplifica a técnica.

Tabela 4.1 - Atribuição de pesos com SMART

Etapa 1: ordenação	Etapa 2: pontuação	Etapa 3: Normalização
Critério A (mais importante)	100	$100/235 = 0,425532$
Critério B	70	$70/235 = 0,297872$
Critério C	30	$30/235 = 0,127660$
Critério D	25	$25/235 = 0,106383$
Critério E (menos importante)	10	$10/235 = 0,04255$
Somatório	235	

Método *Swing Weighting*. O decisor é convidado a considerar a situação hipotética de uma alternativa que possui a menor pontuação em todos os critérios envolvidos no processo de decisão (GOODWIN; WRIGHT, 2005). Com isso é criada uma situação de benchmark (referência), caracterizada pelo pior cenário (VON WINTERFELDT; EDWARDS, 1986).

O decisor atribui 100 pontos para o critério que decide elevar à maior pontuação possível. Após atribuir 100 pontos para esse critério, é eliminado do processo. O decisor consulta os critérios restantes e novamente escolhe o critério que gostaria de elevar e atribui um valor inferior a 100 pontos e assim sucessivamente (MUSTAJOKI; HAMALAINEN; LINDSTEDT, 2006). Portanto, o decisor atribui uma ponderação para cada critério partindo do mais relevante até o critério com pouca relevância. A Tabela 4.2 apresenta o exemplo de ponderação utilizando a técnica interativa *Swing Weighting*, onde o peso do critério é igual à nota do critério dividida pela soma de todas as notas.

Tabela 4.2 - Atribuição de pesos com *Swing Weighting*

Critérios	Ranking	Nota	Peso
Critério A - menos relevante	3	0	$0/130 = 0$
Critério B	1	100	$100/130 = 0,76923$
Critério C	2	30	$30/130 = 0,23076$
Somatório	130		

Método *Interval SMART/Swing Weighting*. O atributo de referência pode ser qualquer atributo, não precisa ser necessariamente o mais importante ou o de menor importância, permitindo que o decisor utilize intervalos de julgamento na ponderação e avalie

as alternativas considerando a imprecisão (MUSTAJOKI; HAMALAINEN; LINDSTEDT, 2006). Portanto, segundo estes próprios autores, o método apresentado permite a modelagem de imprecisão sem a perda significativa da facilidade já constatada pelos métodos SMART e *Swing Weighting* no processo de ponderação dos critérios.

Método Rank Centroid (ROC). Os pesos são obtidos diretamente a partir da ordem de importância dos atributos e através de uns valores pré-definidos, chamados pesos ROC (BARRON E BARRET, 1996). A ideia chave é simples. Se nada fosse sabido sobre os pesos, exceto sua soma, definida como 1 por convenção, então o conjunto das possíveis ponderações, não negativas, seria qualquer um que tivesse essa soma. O cálculo dos pesos ROC tem uma forma computacional conveniente dado por:

$$w_k = (1/K) \sum_{i=k}^K \left(\frac{1}{i}\right) \quad (4.5)$$

Onde w_k é o valor peso ROC dos critérios de ordem k e sabe-se que $w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_K$, (w_1 é o atributo mais preferido e w_K o menos preferido), então:

$$\begin{aligned} w_1 &= (1 + 1/2 + 1/3 + \dots + 1/K)/K \\ w_2 &= (0 + 1/2 + 1/3 + \dots + 1/K)/K \\ w_3 &= (0 + 0 + 1/3 + \dots + 1/K)/K \\ &\vdots \\ w_K &= (0 + 0 + 0 + \dots + 1/K)/K \end{aligned} \quad (4.6)$$

Os valores w_k são sempre os mesmos para qualquer conjunto diferente de critérios. A Tabela 4.3 apresenta esses valores calculados quando se trabalha de 2 até 8 critérios.

Tabela 4.3 - Pesos ROC de acordo com o número de atributos. Fonte: Edwards e Barron (1994)

Designação	Número de critérios						
	8	7	6	5	4	3	2
w_1	0,3397	0,3704	0,4083	0,4567	0,5208	0,6111	0,7500
w_2	0,2147	0,2276	0,2417	0,2567	0,2708	0,2778	0,2500
w_3	0,1522	0,1561	0,1583	0,1567	0,1458	0,1111	
w_4	0,1106	0,1085	0,1085	0,0900	0,0625		
w_5	0,0793	0,0728	0,0611	0,0400			
w_6	0,0543	0,0442	0,0278				
w_7	0,0335	0,0204					
w_8	0,0156						

Método AHP. De forma geral, o processo de análises hierárquico é uma abordagem de comparação de alternativas quando um decisor é confrontado com um problema que envolve múltiplos critérios. O método foi desenvolvido por Thomas Saaty em 1970 e tem sido

utilizado em áreas como economia, planejamento, política energética, seleção de projeto, entre outras (GOODWIN; WRIGHT, 2005).

Saaty (1980) aprimorou o AHP por meio da derivação das escalas prioritárias ao comparar um elemento a outro. Esta comparação é feita com o auxílio da escala fundamental com valores de 1-9 (Tabela 4.4). Através desta escala, o decisor pode expressar as suas preferências em relação aos dois elementos que estão sendo comparados. Essa escala é usada usualmente para medir elementos intangíveis em termos relativos. Segundo o autor, a tomada de decisão envolve muitos critérios utilizados para classificar as alternativas e muitas vezes esses critérios são de natureza intangível, onde não há medidas que sirvam como guia para classificar as alternativas e criar prioridades entre elas. Portanto o processo de ponderar as prioridades dos critérios é uma tarefa complicada.

Tabela 4.4 - Escala fundamental de Saaty. Fonte: Saaty (1980)

Intensidade	Definição
1	Igual importância
3	Importância pequena de uma sobre a outra
5	Importância relativa de uma sobre a outra
7	Importância muito forte de uma sobre a outra
9	Importância absoluta de uma sobre a outra
2,4,6,8	Valores intermediários que caracterizam a excitação do decisor entre 2 patamares
Recíprocos dos números acima	Se o elemento i possui um dos números acima, quando comparado com o elemento j, o elemento j possuirá o valor inverso comparado com i.

Apesar de o AHP ser uma alternativa ao SMART para auxílio à tomada de decisão multicritério, nesta dissertação ele é usado unicamente como um método de ponderação de critérios. Isto devido a que sua estrutura axiomática como método de comparação de alternativas tem sido muito criticada (GOODWIN; WRIGHT, 2005, p. 421). No entanto tem demonstrado ser uma ferramenta muito utilizada e aceita na ponderação de critérios. Vaidya e Kumar (2006) realizaram uma revisão de literatura sobre aplicações AHP sobre 150 artigos estudados. Os autores encontraram que AHP é amplamente aplicado na área de engenharia, especificamente para problemas de seleção e avaliação. Ressaltaram também a flexibilidade do AHP para ser combinado com outras técnicas de tomada de decisão. Adicionalmente, Subramanian e Ramanathan (2012) realizaram uma revisão de literatura sobre aplicações AHP na gestão de operações sobre 291 artigos estudados. Os autores descobriram que o AHP tem sido principalmente aplicado na gestão da cadeia de suprimentos, especificamente para problemas de localização, seleção de fornecedores, desenhos e avaliação de redes de suprimentos, entre outros. Os autores também indicaram que 80% das aplicações AHP em gestão de operações foram para casos práticos e em 51% dos casos o AHP foi combinado com

outros métodos, sendo: método Delphi, Enfoque Bayesiano, análise envoltória de dados, programação linear, algoritmos genéticos, programação de metas, simulação, entre outros.

Os passos do AHP como definido por Saaty (1980) são, basicamente, a comparação entre pares de critérios, determinação do vetor de prioridades e determinação do índice de inconsistência. Um exemplo é apresentado no Apêndice C.

4.4 Considerações sobre os métodos utilizados

Neste capítulo, foram apresentados alguns métodos analíticos de tomada de decisões multicritério, bem como os seus fundamentos teóricos e axiomáticos. Pretende-se agora finalizar sintetizando as motivações para a escolha destes métodos como parte da proposta metodológica.

Segundo Gomes, Araya e Carignano (2004) escolher um método multicritério envolve vários fatores como as características do problema, do contexto considerado, e da estrutura de preferências do decisor. Por outro lado, estudos comparativos entre os diferentes métodos de apoio à decisão multicritério, mostram que não existem metodologias que podem ser apontadas como melhores em relação às outras em qualquer situação (FIGUEIRA; GRECO; EHRGOTT, 2005), mas os métodos de apoio à decisão podem representar diferentes respostas para o mesmo problema (OZERNOY, 1992).

Segundo Ozernoy (1992), a escolha de qual método utilizar na solução de um problema, por si só, já é um problema de decisão multicritério e a utilização de um método não adequado pode resultar na sugestão de uma alternativa que possa não ser justificada. Por isso é importante identificar qual método é mais adequado, considerando paralelamente o contexto e o tipo de problema tratado.

Inicialmente o uso de métodos não compensatórios é mais razoável para o problema apresentado nesta dissertação. Como foi exposto por Goodwin e Wright (2005), nas grandes decisões, uma análise mais elaborada se torna mais necessária. Em segunda instância, opta-se pelo uso de métodos analíticos da escola americana. Como definido por Gomes, Gomes e Almeida (2002), estes algoritmos não permitem incomparabilidades entre as alternativas (o decisor deve ser capaz de escolher) e garantem a existência de transitividade.

A motivação pelo uso do SMART é baseado em duas crenças, tal como são citadas por Edwards e Barron (1994):

- A escolha do método a ser utilizado deve considerar o *trade-off* entre o erro na modelagem e o erro na elicitação, e

- As ferramentas mais simples são mais fáceis de utilizar, sendo mais bem entendidas, e provavelmente serão realmente utilizadas na prática.

Os indícios de não linearidade no comportamento de alguns critérios do problema (como será apresentado no caso) é também uma motivação para uso do SMART. Esta abordagem esta baseada na teoria da utilidade multiatributo (MAUT). Consequentemente, a MAUT permite lidar com a não linearidade de preferências por meio da criação de curvas de utilidade.

Na metodologia proposta, as alternativas não necessariamente serão conhecidas com antecipação, pois elas serão geradas também a partir do modelo matemático, o que evidencia a incerteza na questão. O método de certeza equivalente será usado para levantar as curvas ou funções de utilidade.

A motivação pelo uso de AHP como método de ponderação de critérios é porque ele demonstra ser, na literatura como na prática, um método aceito, especificamente nos problema de logística e cadeia de suprimentos (SUBRAMANIAN; RAMANATHAN, 2012).

Assim na metodologia proposta, a estrutura de decisão será construída através do SMART, incorporando AHP para atribuição de ponderações e um modelo de programação matemática multiobjetivo para a geração das alternativas. Como apresentado na Figura 4.4.

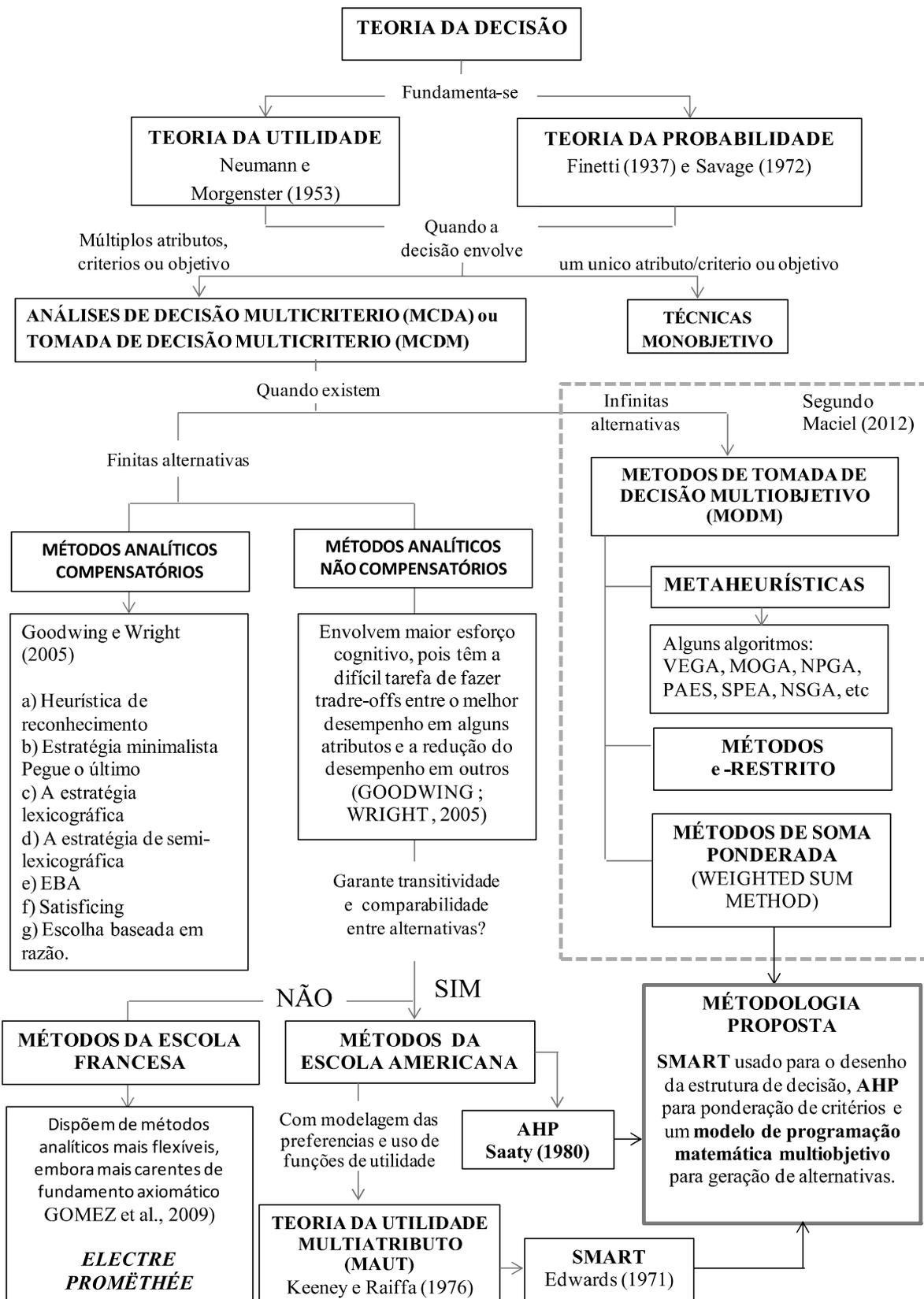


Figura 4.4 - Classificação dos métodos usados na abordagem proposta.

5. ABORDAGEM PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO MULTICRITÉRIO

Neste capítulo será apresentada detalhadamente, e de forma genérica, a proposta metodológica baseada nos axiomas, conceitos, e métodos da análise de decisão multicritério introduzidas no capítulo 4. Toma-se como base o problema integrado de distribuição e estoque caracterizado no capítulo 3.

O capítulo está dividido em duas seções. Primeiramente, na seção 5.1, serão levantados da literatura alguns critérios que têm demonstrado influenciar a decisão de escolha de prestadores de serviços de transporte ou modos de transporte rodoviários. Na seção 5.2, a abordagem proposta é apresentada.

5.1 Critérios relevantes na escolha de transportadores

O problema de seleção do tipo de serviço de transporte que uma organização pretende contratar tem sido amplamente abordado nas últimas décadas devido ao aumento das alternativas de transporte no modal rodoviário para atendimento de uma crescente e variada demanda. É essencial para as empresas determinar o modo de transporte de carga utilizado, já que esta escolha tem influência sobre diferentes aspectos, tais como, custos da distribuição, imagem corporativa, confiabilidade, restrições de acesso a vias públicas (principalmente nos grandes centros urbanos), etc. Alguns critérios que autores têm indicado para apoiar as decisões na escolha de entre os modos de transporte são apresentados nesta seção. Devido à natureza deste estudo, a literatura pertencente às decisões de escolha de transportadores (*carrier selection*) e operadores logísticos (*third-party logistics selection -3PL*) foram revisadas. Dentre os critérios apontados, foram escolhidos aqueles de interesse particular para a escolha entre cargas FTL e LTL.

Um dos primeiros trabalhos em avaliar a relevância de um conjunto de critérios para seleção de transportadores foi o trabalho de Jerman, Anderson e Constantin (1978). Através de questionários enviados a 2.000 empregados de níveis operacionais pertencentes tanto a empresas embarcadoras como transportadoras, os autores avaliaram e compararam as preferências de 26 critérios de seleção de prestadores de serviços de transporte. Os autores encontraram algumas diferenças significativas e semelhanças nas preferências entre embarcadores e transportadores. Em síntese, ambas as partes indicaram dentro dos cinco critérios mais importantes: "Cooperação entre o pessoal de embarque e transporte", "Conhecimento das necessidades do embarcador por parte do transportador" e "Capacidade do

transportador para rastrear rapidamente os embarques". Particularmente, para transportadores outros critérios relevantes foram "Reputação da confiabilidade do transportador" e "Reputação em qualidade de serviço". Por outro lado, para embarcadores outros critérios relevantes foram: "Tempo total de transporte da carga (ou velocidade do transporte)" e "Atitude do transportador para mudanças nas taxas". Ainda neste trabalho, seis fatores (ou critérios de primeiro nível) foram derivados através da técnica de análises de componentes principais com objetivo de identificar as dimensões que fundamentam o processo de seleção. Estes fatores foram definidos como: Mudanças e privilégios, Histórico de desempenho (experiência de perda e dano, desempenho passado, etc.), Imagem do transportador (reputação de confiabilidade e qualidade, flexibilidade, etc.), Atitude para negociar as taxas (Assistência e liderança do transportador no ajuste tarifário), Capacidades no roteamento (tempo, rastreamento, proximidade do transportador, etc.) e Conhecimento do carregador (cooperação, comunicação frequente, etc.).

Os autores advertem a necessidade por parte dos transportadores para alinhar as suas percepções com as preferências dos embarcadores. Os critérios são apresentados na Tabela 5.1, vale ressaltar que nem todos eles foram aqui considerados. O critério "Privilegio de fabricação em trânsito", por exemplo, não é adequado para o problema definido e critérios como "Cortesia dos operadores de veículos" e "Limpeza dos operadores de veículos" foram agrupados em um critério de caráter mais geral ("Qualidade do pessoal de transporte").

Em outro trabalho semelhante, Bardi, Bagchi e Raghunathan (1989) avaliaram a importância relativa de 18 critérios influentes na seleção de transportadoras. Através de um questionário enviado a 1.000 administradores de empresas carregadoras (com uma taxa de resposta de 29%), os autores mediram as preferências e as compararam com um estudo realizado com as mesmas variáveis em 1984 (BARDI et al., 1984). No questionário utilizado, os respondentes indicaram o grau de relevância para cada critério em uma escala de cinco pontos. Os autores encontraram uma mudança na ordem de preferências, em comparação com o estudo posterior, sendo o critério mais importante "Confiabilidade do tempo em trânsito", seguido pelo "Custo de transporte" e "Tempo total de trânsito". Para o estudo prévio, o "Custo de transporte" foi referido como o mais importante. Os autores também encontraram como critérios menos relevantes "Equipamentos especiais" e "Qualidade do pessoal de transporte". Através de análise fatorial, quatro fatores foram derivados com objetivo de realizar testes sobre as diferenças significativas entre os entrevistados com base em mudanças nas práticas da seleção de transportadoras. Um aspecto interessante desta pesquisa foi a realização da

análise comparativa da importância que embarcadores dão para vários critérios em condições de mercado diferentes. Os critérios restantes são apresentados na Tabela 5.1.

Murphy, Daley e Hall (1997) realizaram um levantamento de critérios. Através de um estudo aplicado para 350 empresas embarcadores e 360 transportadoras os autores avaliaram e compararam a importância destes critérios em uma escala de cinco pontos. Os autores encontraram que embarcadores atribuíram maior importância do que as transportadoras para 17 dos 18 critérios considerados, sendo 10 estatisticamente significativas. Curiosamente, essas diferenças também estavam presentes em outros estudos prévios. Em Evans e Southard (1974), 4 dos 28 critérios avaliados por embarcadores e transportadoras apresentaram diferenças significativas nas preferências. Em Jerman, Anderson e Constantin (1978) 14 dos 26 critérios foram ponderados significativamente diferentes. Para Abshire e Premeaux (1991), 19 de 35 foram considerados significativamente diferentes, respectivamente. Estes resultados colocaram em evidência a desconexão da época das estratégias das transportadoras com as necessidades reais dos embarcadores, e motivaram a aparição de um conjunto de trabalhos para tentar delinear estas preferências.

O trabalho de Coulter et al. (1989) tentou delinear as preferências de serviço. Eles introduziram uma abordagem para segmentar as empresas embarcadoras de acordo com as suas preferências. Isto, a fim de permitir aos transportadores criar estratégias específicas para atender cada segmento. Para fazer isso, uma lista original de 50 atributos, obtida de revisões de literatura, foi reduzida por dez expertos para 21 critérios relevantes. Um questionário foi desenvolvido a fim de avaliar a preferência, sendo enviado para uma amostra de 373 empresas embarcadoras, com uma taxa de retorno de 24,12%. Seus 21 critérios de seleção foram agregados em cinco fatores (confiabilidade, segurança, qualidade do serviço, fator de personalização e manuseio) através de análise discriminante. Usando análise de *cluster*, eles identificaram seis segmentos de embarcadores exclusivos dentro da sua amostra, para os quais cada grupo priorizou um conjunto de critérios em relação a outros. Esta pesquisa demonstrou a necessidade de transportadores para desenvolver estratégias de marketing exclusivas para cada segmento identificado. Os autores também mostraram que tanto os grupos como os critérios definidos são úteis para escolhas entre diferentes modos de transporte.

Sobre estudos focados somente nas percepções dos embarcadores. Gibson, Sink e Mundy (1993) encontraram para sua amostra que embarcadores percebem "Histórico de desempenho", "Qualidade do serviço" e "Frequência do serviço" como critérios mais importantes na escolha de um provedor de transporte. Em outros resultados reportados por

Hall e Wagner (1996), embarcadores perceberam "Coleta e entrega no prazo", "Condição de equipamentos de transporte" e "Atitude para melhorar a qualidade do serviço" como os critérios mais importantes. Crum e Allen (1997) estudaram a perspectiva dos transportadores de como eles acham que seus clientes os escolhem e usando um desenho de pesquisa longitudinal compararam a relevância de critérios em 1990 e 1996. Nenhuma diferença significativa na ordem de priorização foi encontrada. No entanto, no último estudo a maior parte dos critérios foi avaliada como mais importantes. Os autores concluíram que os transportadores perceberam aos embarcadores cada vez mais exigentes no serviço de transporte desejado.

Lu (2003) também investigou sobre as parcerias carregador/transportador. Especialmente, o autor explorou a influência de 30 critérios sobre a relação de parceria usando modelagem de equações estruturais com dados de uma pesquisa levantamento. Eles encontraram como critérios principais a "Capacidade (disponibilidade de espaço de carga)", "Baixa perda e dano", "Documentação e faturamento preciso" e "Confiabilidade dos horários de saída". Através de análise fatorial, os 30 critérios foram agregados em sete fatores relacionados ao: tempo, custo, serviços de armazenagem, de venda, serviços porta a porta, de informação e de publicidade. Após, análise de correlação foi realizada entre os fatores, os níveis de satisfação dos embarcadores e a parceria. Os autores encontraram que os fatores de tempo, custo, serviços de armazenagem e vendas foram positivamente correlacionados com a satisfação dos embarcadores, e adicionalmente, o fator custo e o nível de satisfação teve uma correlação positiva com a orientação à parceria, na amostra estudada.

Dentro das abordagens de ponderação de preferência, AHP destaca como método amplamente usado. Min (1998) desenvolveu um sistema de apoio à decisão auxiliado por computador para ajudar aos gestores de logística na escolha do tipo mais adequado de transporte. Nesse sistema, foi integrado o método AHP e os critérios relevantes: custo, qualidade do serviço, responsabilidade por perdas e danos, disponibilidade dos motoristas e imagem do transportador. Kulak e Kahraman (2005) desenvolveram uma abordagem AHP combinada com técnicas da teoria multiatributo para estudar a seleção de empresas de transporte, levando em conta os critérios: custo de transporte, taxa de perda ou dano, taxa de atraso (confiabilidade do tempo), flexibilidade e documentação.

Danielis, Marcucci e Rotaris (2005) realizaram estudos em 65 empresas embarcadoras de diferentes setores através da técnica de Análise Conjunta (*Joint Analysis*). Um dos objetivos do estudo foi avaliar e comparar as preferências de dez grandes setores industriais

frente a quatro dos critérios mais mencionados na literatura para seleção de transportador, sendo: custo, tempo em trânsito (ou velocidade do transporte), risco de atraso (ou confiabilidade) e risco de perda e dano. Os autores encontraram diferenças significativas em relação à avaliação de preferências entre os diferentes setores e entre os critérios, além de diferenças na preferência entre transporte de insumos ou produtos terminados. Nos setores de produtos químicos, fibras e máquinas foram observadas altas preferências pela qualidade do transporte (tempo, confiabilidade e risco de perda e dano) em relação ao custo. Por outro lado, para o setor de equipamentos elétricos, indicaram uma alta preferência na confiabilidade do tempo de entrega e no risco de perda e dano com relação ao custo. Para produtos acabados o critério tempo em trânsito teve também alta relevância. Embora, a amostra seja relativamente pequena, esta pesquisa colocou em evidência a preferência dos critérios em função das características dos produtos de cada setor em específico.

Voss et al. (2006) abordaram a seleção de transportadores através de uma pesquisa *survey* de duas partes, sobre 100 especialistas em logística. Este estudo foi um dos primeiros a considerar a "Segurança da carga" no conjunto de critérios chave. Os critérios restantes são apresentados na Tabela 5.1.

Mohammaditabar e Teimoury (2008) desenvolveram uma metodologia integrada de três fases para resolver um problema real de seleção de transportadores. Na primeira fase, foram selecionados cinco grupos de critérios que influenciaram a escolha do transportador. Eles foram: os custos relevantes (custo de transporte, custo de estoque, custo de gestão de estoque em trânsito, flexibilidade no preço), o atendimento ao cliente (qualidade do pessoal de transporte, ligações computadorizados e flexibilidade na entrega), segurança na prestação do serviço (estabilidade financeira do transportador), serviços de gestão de carga (habilidade de gestão de cargas especiais, embarques acelerados e capacidade) e compatibilidade estratégica (experiências anteriores, consistência das estratégias, reputação e possibilidade de relacionamento em longo prazo). Na segunda fase, foi usado AHP para atribuir pesos a cada transportador com relação a cada critério. Na última fase, foi determinada a quantidade de carga alocada a cada transportador em função das ponderações obtidas com AHP.

Mais recentemente, Anaya (2009) indicou que além das características de custo, a qualidade do serviço de transporte geralmente é uma função das exigências do mercado e engloba uma série de conceitos relacionados com aspectos como: rapidez e pontualidade de entrega, confiabilidade das datas prometidas, segurança e higiene, cumprimentos dos condicionantes impostos pelo cliente, informação e controle do transporte, rastreamento,

facilidade de fazer mudanças, cumprimento da legislação e custo. O autor adverte que estes aspectos devem ser considerados junto ao custo para tornar a escolha mais compensatória.

Para um caso real em uma empresa de alimentos congelados, Peng (2012) avaliou três fornecedores de serviços logísticos através de abordagem AHP. Dentro dos critérios de seleção foram levados em conta: o custo, eficiência operacional (velocidade operacional, rapidez operacional e precisão da operação), qualidade do serviço (satisfação do cliente, compatibilidade de cultura, e crédito da empresa) e tecnologia (tecnologia da informação, de armazenamento e de transporte). Para o seu caso, os critérios de custo e tecnologia foram considerados como mais importantes.

Em uma abrangente pesquisa, Williams, Garver e Taylor (2013) usando dados coletados de 222 embarcadores de carga fracionada (LTL) examinaram 17 critérios de seleção, alguns deles até a data não tinham sido considerados. Dentro destes critérios, encontraram-se "Práticas sustentáveis" e "Utilidade do site *web* da transportadora". Os critérios restantes são apresentados na Tabela 5.1. Diferente dos métodos tradicionais de análises estatísticos, os autores utilizaram a técnica *Maximum Difference Scaling* para obter classificações de prioridade. Sobre os resultados obtidos, os critérios mais importantes foram "Confiabilidade no tempo de entrega" e "Confiabilidade no tempo de coleta", além de "Custos" e "Tempo total de trânsito (velocidade)". Por outro lado, critérios pouco relevantes foram "Comunicação frequente com o transportador (compartilhamento de informações)" e "utilidade do site *web* da transportadora". Adicionalmente, análise de cluster, foi usada para segmentar a sua amostra de embarcadores grupos característicos.

Outras pesquisas de seleção de operadores logísticos (3PL) têm sido executadas por Anderson et al. (2010), Coltman, Devinney e Keating (2011) e Galo (2014). Estes trabalhos apontam critérios contemporâneos relevantes para a escolha entre diferentes empresas prestadoras de serviços de transporte, mas alguns deles sem muita influência no processo de seleção do tipo de carga. Neste sentido critérios como estabilidade financeira, inovação, profissionalismo do transportador, certificação de qualidade, métodos de pagamento não foram considerados.

Com base nos trabalhos anteriores, algumas conclusões podem ser alcançadas. Alguma destas considerações também forma distinguidas por outros autores.

Em primeiro lugar, observou-se que as variáveis de seleção de transportadores emergem ou mudam ao longo do tempo. Portanto, embora, no momento, sejam suscetíveis de serem critérios relevantes, tal vez não foram importantes no passado ou não serão importantes

no futuro (MEIXELL; NORBIS, 2008). Isto implica que embora, exista uma rica literatura de revisão de critérios, novos esforços devem ser realizados para delinear estas preferências.

Em segundo lugar, as questões de homogeneidade do mercado (necessidades semelhantes em diferentes embarcadores) e heterogeneidade do mercado (necessidades específicas de diferentes embarcadores) têm sido pouco estudadas (WILLIAMS; GARVER; TAYLOR, 2013). Algumas pesquisas têm sugerido que as necessidades podem variar dependendo do setor, e mesmo entre empresas de um mesmo setor (DANIELIS; MARCUCCI; ROTARIS, 2005; MURPHY; DALEY; HALL, 1997). No entanto, nenhuma pesquisa abrangente foi encontrada.

Em um caso mais rigoroso, e como será observado nesta dissertação, as relevâncias e a consideração dos critérios podem mudar entre os diversos tomadores de decisões que tratam um mesmo problema.

Em terceiro lugar, embora muitas abordagens para análise dos critérios foram encontradas, observou-se pouca pesquisa de combinações multi-metodológica. Meixell e Norbis (2008) realizaram uma revisão sobre as pesquisas publicadas entre 1988 e 2008 acerca de seleção de modais e prestadores de serviços de transporte e afirmaram que apenas 18% dos artigos empregaram metodologias como: simulação, estudos de caso, e combinações multi-metodológicas. Deste modo, este trabalho também contribuiu com a extensão da literatura sobre seleção de modos de transporte por meio de um estudo de caso e usando uma abordagem combinada para a análise da decisão.

Os critérios aqui levantados consideram-se de caráter relevante para ajudar ao decisor escolher entre os dois tipos de carga. A Tabela 5.1 apresenta um resumo destes critérios, bem como o número de vezes citados. Definições operacionais foram tomadas de alguns autores para capturar o domínio dos critérios, visando garantir que os respondentes entenderam o significado exatamente da mesma maneira. As definições são apresentadas no Apêndice D.

5.2 Proposta metodológica

A metodologia proposta está baseada na modelagem de valores da teoria de utilidade, conhecida como função de utilidade apresentada no capítulo 3. Essas funções são capazes de incorporar as tolerâncias ao risco dos decisores envolvidos, para avaliar as consequências de um conjunto de alternativas (KEENEY; WINTERFELDT, 2009).

A Figura 5.1 apresenta a estrutura metodológica na qual se fundamenta esta pesquisa. O processo consiste na construção de um modelo decisório baseado em múltiplos critérios relevantes e na utilização de um modelo matemático para geração de alternativas (etapa 5). Uma característica importante desta metodologia é a consideração das funções de utilidade (etapa 3) e a priorização das preferências inerentes dos tomadores de decisões (etapa 4).

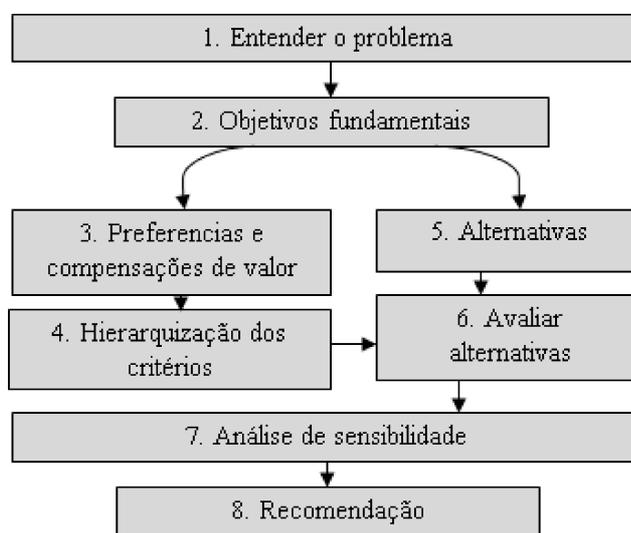


Figura 5.1 - Estrutura da metodologia. Fonte: Montibeller, G.; Franco (2007)

Esta metodologia pode ser classificada dentro das abordagens multi-metodológicas ou combinada da tomada de decisão multicritério (MCDM), que devido a sua capacidade para considerar vários aspectos relevantes na tomada de decisão, tem ganhado o interesse de pesquisadores nos últimos anos (WALLENIUS et al., 2008). Especificamente, consideram-se o método SMART da teoria da utilidade multiatributo (MAUT) e o método AHP.

5.2.1 Justificativa para o uso da abordagem multicritério proposta

Alguns autores têm demonstrado o crescimento e aceitação da utilização deste tipo de abordagem para solução de problemas contemporâneos. Aguezzoul (2014) realizou uma revisão de literatura sobre critérios e métodos para seleção de operadores logísticos através de artigos publicados entre 1994 e 2013 em importantes bases de dados. Em termos de métodos para seleção de 3PL, eles categorizaram cinco grupos, os quais foram chamados: abordagem

MCDM, abordagem estatística, inteligência artificial, programação matemática e os métodos combinados ou híbridos. Os autores descobriram que abordagens MCDM são as mais amplamente utilizadas para o problema de seleção de operadores logístico (82% dos casos) e adicionalmente são comumente integrados com métodos da mesma categoria, ou com modelos de redes neuronais artificiais (ANN), MIP e DEA. Dentro dos métodos MCDM, AHP demonstrou ser o mais prevalente, devido a sua facilidade de uso e flexibilidade para se combinar com outros métodos. Por outro lado, métodos como SMART e técnicas de inteligência artificial foram raramente implementadas.

Ho, Xu e Dey (2010) também apresentaram uma revisão de literatura sobre abordagens MCDM, porém para o problema de seleção e avaliação de fornecedores. Para os 78 artigos revisados no período de 2000-2008, mais de 40% dos trabalhos foram referidos a abordagens integradas, sendo a combinação mais popular AHP-programação de metas (GP). Por outro lado, SMART mostrou ser um dos métodos mais populares como abordagem individual. Em uma mais recente revisão sobre métodos para seleção de fornecedores, Chai, Liu, Ngai (2013) encontraram também AHP sendo o método mais utilizado.

Dentro dos trabalhos mais interessantes de aplicações multi-metodológica, Ho e Emrouznejad (2009) apresentaram uma abordagem combinada de AHP com programação de metas para o problema de desenho de rede logística. Nesta abordagem, AHP foi utilizado para avaliar o desempenho de diferentes armazéns com relação a um conjunto de critérios (*lead time*, confiabilidade de cumprimento do pedido, qualidade, flexibilidade e serviços de valor agregado). Desta forma, os critérios foram comparados com relação ao objetivo geral e os armazéns foram comparados com relação a cada critério para obter um ranking de prioridade geral. Então, o modelo matemático de programação de metas incorporou as restrições do sistema e as prioridades AHP para selecionar o melhor conjunto de armazéns a serem utilizados na rede de distribuição. A principal contribuição deste trabalho foi na utilização das prioridades AHP de cada armazém para penalizar os desvios com relação aos objetivos. Desta forma, armazéns com melhor desempenho nos critérios avaliados implicariam menores desvios com relação aos valores metas, sendo mais suscetíveis de serem utilizados. Um exemplo teórico foi também apresentado para ilustrar a abordagem.

Citron, Ravidran e Ventura (2010) também trabalharam sobre um modelo de otimização multicritério para desenho de uma rede de distribuição. Especificamente a abordagem foi útil para indicar a forma em cada cliente devia ser fornecido considerando um conjunto de critérios relevantes (lucro, *lead time*, desejo para manter o cliente, desempenho

creditício do cliente e reputação da transportadora). Neste trabalho, quatro alternativas para o envio dos produtos até clientes foram avaliadas sobre um caso real. Assim, os produtos podiam ser entregues desde um CD, desde a fábrica diretamente, através de um transportador contratado e fornecido pelo CD, ou com um transportador contratado e fornecido desde a fábrica diretamente. AHP foi utilizado para ponderação dos critérios e o modelo matemático para otimização do lucro da rede. A utilização da abordagem combinada permitiu aos decisores indicar a preferência em que cada cliente devia ser atendido diretamente pela fábrica ou deixado para ser atendido de forma terceirizada. O anterior, baseando-se no desempenho creditício e crescimento econômico do cliente, e considerando a reputação e *lead time* das transportadoras contratadas. A abordagem sugeriu à empresa do caso redefinir a sua rede logística, passando de atender de 60% para 83% dos clientes através da fábrica diretamente.

Para um problema de transporte, Sultana (2012) apresentou uma abordagem de otimização multicritério através de AHP e programação linear. A abordagem proveu uma ideia para a seleção da melhor função objetivo e do melhor modelo de distribuição considerando quatro critérios de avaliação (facilidade para gestão, custos de transporte, integração e confiabilidade). Os três modelos considerados foram: (1) Modelo com reposição por ponto de pedido, (2) Modelo com reposição periódica e (3) Modelo misto. No primeiro caso, foi assumido para a fábrica operar seus próprios CDs e lojas de varejo, implicando um controle do inventário constante, bem como maior integração, confiabilidade e facilidade para gestão. Para o segundo caso, a fábrica foca-se na sua função produtiva alcançando uma maior facilidade para gestão. Para avaliação da abordagem proposta, dados primários e demais informações foram coletadas de diferentes empresas para estimar o desempenho de cada modelo de distribuição com relação a cada critério. Finalmente, um caso real em uma empresa de móveis foi abordando para definir as preferências entre os critérios. Os resultados indicaram como o modelo mais adequado para o caso, o modelo de reposição por ponto de pedido. Um modelo matemático para otimização dos custos de transporte sobre o modelo do ponto de pedido, foi então proposto.

Finalmente, o trabalho De La Vega, Vieira e Toso (2014) é uma útil e adequada representação de como a metodologia proposta pode ser bem aplicada. Para um problema de localização de centros de distribuição com múltiplas capacidades, e através de dados simulados, os autores ilustram cada passo da metodologia. Um conjunto de critérios de base qualitativa e quantitativa para localização de centros de distribuição foi levantado da literatura. As valorações de preferência e o desenho das curvas de utilidade foram obtidas

através dos julgamentos de decisores especialistas da área. De forma semelhante a este trabalho, um modelo matemático foi utilizado como base para geração de alternativas. Assim, múltiplas funções objetivo foram propostas para minimizar os custos de operação, investimento e tempos de atendimento. Como resultado, a metodologia permitiu sugerir a localização, bem como a capacidade, dos centros de distribuição a serem abertos, considerando critérios como possibilidade de expansão, incentivos fiscais, disponibilidade de mão de obra qualificada, impacto ambiental, entre outros.

A Tabela 5.2 apresenta a classificação proposta por Aguezzoul (2014) para abordar problemas quando múltiplos critérios/objetivos são considerados. Alguns métodos, bem como pontos fortes e fracos de cada classificação são também apresentados. Neste ponto podem ser observados os potenciais benefícios que surgiriam da utilização de abordagens combinadas.

Tabela 5.2 - Abordagens de solução para problemas com múltiplos critérios

Categoria	Métodos	Pontos fortes	Pontos fracos
MCDM	MAUT's	(1) De rápido e fácil uso	(1) As ponderações atribuídas para os critérios dependem dos julgamentos humanos.
	AHP	(2) Podem lidar com múltiplos critérios de caráter qualitativo ou quantitativo.	(2) Nenhuma possibilidade de incluir restrições nos modelos.
	ANP		(3) A construção das matrizes de comparação e curvas de utilidade (elicitación) é uma tarefa tediosa e consome muito tempo.
	TOPSIS		
	ELECTRE	(3) Consideram a dependência entre os critérios.	
	ISM		
	VIKOR		
	DEMATEL QFD		
Abordagens estatísticas	Métodos de correlação	(1) Permitem análises sobre grandes bases de dados.	(1) Não fornecem nenhuma solução ótima.
	Análises de cluster	(2) Podem ser aplicado para problemas complexos.	(2) Nenhuma possibilidade de incluir restrições no modelo.
	Binary Logit		(3) Dificuldade para definir "cluster" quando os critérios são altamente dependentes.
Programação matemática	LP/NLP	(1) Possibilidade de introduzir restrições no modelo.	(1) Dificuldade para mensurar critérios qualitativos.
	MILP		(2) Dificuldade para analisar os resultados, no caso de MOP.
	MOP	(2) Podem otimizar variáveis desejadas.	
	DEA		(3) Computação da solução ótima pode consumir muito tempo, em problemas NP-Hard.
	DP	(1) O critério não necessariamente tem uma dimensão comum.	
Inteligência artificial	Mineração de dados	(1) Oferecem uma base de conhecimento flexível.	(1) O conjunto de conhecimentos e acesso a conhecimentos é difícil.
	ANN	(2) Levam em conta fatores qualitativos.	(2) Podem ser muito caros.
	Método Delphi	(3) Podem trabalhar melhor com complexidades e incerteza, pois são concebidos para operar em forma similar aos julgamentos humanos.	
	Inference method		

Para esta dissertação é particularmente interessante a integração MCDM-Programação matemática. Portanto, a dificuldade dos modelos matemáticos para considerar aspectos inviáveis de representação algébrica (critérios de base qualitativa), poderia ser compensada pelo uso de ferramentas MCDM. Da mesma forma, a incapacidade dos métodos MCDM para incluir restrições poderia ser resolvida pelas abordagens de programação que agregam eficiência e objetividade ao processo decisório.

5.2.2 Passos para a implementação da abordagem metodológica

Os passos para implementação da proposta (abordagem de otimização multicritério) são baseados na estrutura metodológica de Montibeller e Franco (2007), descrita a seguir.

Entendimento do problema e classificação

Esta etapa consiste na definição, por partes de decisores e analistas, do problema a ser resolvido. De forma estratégica, o escopo e as limitações devem ser definidos. Esta análise descritiva ajuda a evidenciar as restrições e incertezas associadas ao problema. Esta etapa é essencial porque permitirá aos decisores definir de uma forma confiável os objetivos fundamentais, e aos analistas compreender as variáveis mais importantes.

A etapa pode ser realizada por meio de entrevistas com os decisores e observação direta sobre o sistema. Ressalta-se a importância da experiência das pessoas envolvidas neste processo de construção. Como resultado da etapa, deve ser obter a caracterização do problema de pesquisa e os pressupostos para o desenvolvimento do modelo matemático.

Determinação dos objetivos fundamentais

Os objetivos fundamentais são definidos a partir do questionamento aos tomadores de decisão e de acordo com as suas preferências. Esses objetivos representam os critérios de escolha do(s) decisor(es), que quando agrupados de forma estruturada representam a árvore de decisão do problema a ser resolvido.

Cada objetivo é uma afirmação do que se quer atingir no contexto da decisão. Para tornar explícito o objetivo é necessário descrever seus três componentes: contexto da decisão, o objeto e a direção de preferência (Keeney, 1996). Assim, os tomadores de decisões aportam um conjunto preliminar de critérios de acordo com a suas preferências e objetivos.

Segundo Keeney (1996) a decisão deve ser baseada no “pensamento de valor” e não no “pensamento das alternativas”. O autor explica que no pensamento em “valor” é necessário

que os decisores se questionem sobre os objetivos a serem buscados, para depois criar as alternativas que servirão para agregar tais valores.

Além de critérios definidos diretamente pelos decisores, outros critérios podem ser apontados através das revisões de literatura. Isto estimula ao decisor se questionar sobre critérios que inicialmente ele pode desconsiderar, mas que em essência podem ser relevantes. Como resultado desta etapa deve se obter um conjunto de critérios relevantes.

Após a definição dos critérios, pode ser necessário agrupá-los em fatores (critérios de primeiro nível ou gerais) para ajuda ao decisor organizar suas ideias quando muitos critérios estão disponíveis. Fatores como: custos e benefícios, variáveis qualitativas e quantitativas, critérios em curto prazo e longo prazo podem ser estabelecidos. Após, a estrutura pode ser completada adicionando os critérios da lista preliminar aos níveis superiores até formar a chamada árvore de decisão. A execução desta etapa pode envolver entrevistas ou questionários com os decisores, ou bem considerando classificações aceitas na literatura. (LOKEN; BOTTERUD; HOLEN, 2009)

Preferência e avaliação das compensação de valores

Para o conjunto de critérios definidos é necessário fazer uma valorações, isto é, definir atributos ou indicadores. Segundo Keeney e Gregory (2005), cada atributo deve ser compreensível, operacional, abrangente, direto e não deve ser ambíguo.

Keeney e Winterfeldt (2009) identificaram três tipos de atributos para mensuração dos valores, estes atributos são natural, *proxy* e construído. O “*atributo natural*” mede diretamente o nível em que o objetivo se encontra. Em geral, é a métrica mais usada por ter um senso comum na sua interpretação. O “*atributo proxy*” apesar de compartilhar qualidades dos atributos naturais, não mede diretamente o objetivo da decisão e são utilizados quando é difícil selecionar ou medir o atributo natural. Na falta ou inexistência de obter um destes dois tipos de atributos, sugere-se desenvolver uma mensuração capaz de medir diretamente o objetivo, chamado de “*atributo construído*”. Keeney e Winterfeldt (2009) aprofundaram sobre a utilização destes atributos.

O objetivo desta valorização é basicamente tentar descrever o comportamento dos critérios com respeito à relevância e preocupação que gera sobre o tomador de decisões. Este comportamento é dependente da natureza do critério e muitas vezes tentar descrevê-lo não é uma tarefa simples. De acordo com seu caráter, os critérios podem ser classificados como qualitativos ou quantitativos.

Os critérios qualitativos referem-se aqueles que estão dotados sempre de alguma subjetividade. Estes critérios podem ser quantificáveis através de um esforço para encontrar atributos relacionados, mas isto é geralmente complexo. Outra maneira mais simples e também válida para encarar este tipo de critérios, é valer-se do conhecimento, as expectativas e a percepção dos tomadores de decisões por meio da utilizando de uma escala *Direct Rating*, tal como sugerido pelo método SMART (ver seção 4.3).

Para critérios quantitativos supõem a utilização de indicadores objetivos e que podem ser objeto de uma medição direta. Assim, podem ser utilizados atributos de comportamento linear, nos quais uma mudança no valor do atributo tem a mesma importância em qualquer segmento do intervalo definido. Para atributos de comportamento não linear, uma mudança da mesma magnitude no valor nem sempre tem a mesma influência sobre a utilidade.

Para cada critério, através do seu atributo, deve ser desenhada uma função de utilidade para representar a conduta com relação ao risco dos decisores. Sua obtenção é realizada por meio de entrevistas, ou de forma generalizada por meio de técnicas estatísticas multivariadas. O desenho destas funções permitira a comparação das alternativas, no entanto devem ser usadas somente no contexto da decisão, pois não fazem sentido fora do contexto da análise (LOKEN; BOTTERUD; HOLEN, 2009; SANAYEI et al., 2008). Assim, diferentes curvas de utilidade podem ser obtidas em função das características próprias do sistema e do decisor.

Como resultado desta etapa, uma função de utilidade para cada critério em função do seu atributo definido deve ser obtida.

Hierarquização dos critérios

Refere-se à atribuição de ponderações (pesos) para indicar as preferências do decisor em relação ao conjunto de critérios. As ponderações podem ser atribuídas inicialmente entre fatores e logo para os critérios de níveis inferiores, até completar os critérios. Muitos métodos estão disponíveis para ponderação de critérios, como apresentado nos capítulos anteriores. Porém o método AHP tem demonstrado ser por longe o mais usado na literatura. Como resultado desta etapa deve se obter uma hierarquia ou ordenação de critérios, indicando o grau em que cada um é importante com relação ao problema.

Determinação das alternativas: Formulação do modelo matemático

Após classificar os critérios, aqueles de fácil quantificação podem ser parte da formulação matemática. Restrições podem ser utilizadas para garantir aspectos desejados de cada problema específico, como nível de serviço ou capacidades.

Nem todos os critérios podem ser incluídos na modelagem, pois existirão alguns inviáveis de representação algébrica, geralmente de natureza qualitativa. Porém, estes critérios se tornaram parte da metodologia multicritério. A ideia nesta etapa é fornecer com os objetivos selecionados um conjunto de soluções eficientes. Também é provável que decisores tenham em mente algumas soluções factíveis definidas empiricamente. Estas soluções também podem ser consideradas na metodologia proposta.

Avaliação de alternativas

As soluções geradas pelo modelo matemático representam dados de entrada (alternativas) para o modelo multicritério. Assim, por meio das funções de utilidade e as ponderações definidas pelo decisor para cada critério é possível obter um valor de utilidade global para cada alternativa.

O valor de utilidade geral fundamenta-se na função de utilidade multicritério (apresentada na seção 4.2.1), lembrada aqui como a equação 5.1 e definida na forma aditiva por Loken, Botterud e Holen (2009). A alternativa com maior valor nesta função pode ser definida como solução provisória.

$$U(a) = \sum_{i=1}^m k_i u_i(x_i(a)) \quad (5.1)$$

Na equação 5.1, a representa a alternativa avaliada, $U(a)$ é o valor global da função utilidade da alternativa a ; i representa os critérios do problema; $x_i(a)$ é o desempenho da alternativa a em relação ao atributo do critério i ; $u_i(\cdot)$ é a função de utilidade parcial do critério i e finalmente k_i é a ponderação ou preferência do critério i , que se refere ao grau de importância relativa.

A Figura 5.2 apresenta a ideia da abordagem proposta, na qual a estrutura decisória é construída com base nas preferências e preocupações do decisor. O modelo decisório é composto por uma árvore de decisão de critérios relevantes e por um modelo matemático multiobjetivo. A árvore avalia as soluções geradas pelo modelo matemático, ou apresentadas empiricamente pelos decisores, com objetivo de indicar a alternativa mais preferida ou de melhor desempenho geral considerando todos os elementos do problema.

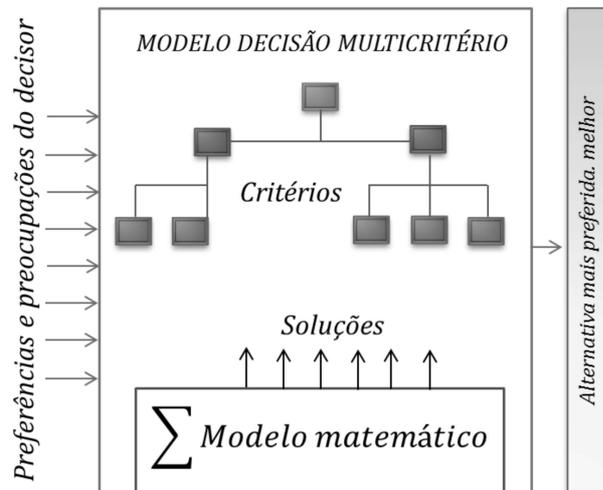


Figura 5.2 - Integração entre o modelo matemático e o modelo multicritério de decisão

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade permite verificar quão confiável é a solução provisória frente a variações nas preferências ou aos cenários propostos pelos decisores. Quando o decisor não tem uma certeza considerável no momento do desenho das funções de utilidade ou na atribuição de ponderações, a análise de sensibilidade pode responder seus questionamentos sem mudar o procedimento nem fazer os cálculos desde o primeiro momento. Do ponto de vista técnico a análise de sensibilidade visa determinar se algum parâmetro exerce influência crítica na avaliação geral do modelo, ou seja, se uma pequena mudança na prioridade ou no desempenho das alternativas em um critério pode provocar uma nova ordem de preferências.

Recomendação de curso de ação

Baseado na análise de sensibilidade, finalmente uma alternativa poderá ser sugerida. Cabe ressaltar que igual a todos os modelos de análises de decisão, esta abordagem não tem como objetivo apresentar ao decisor uma solução excepcional para seu problema. Pelo contrário, visa apoiar o processo decisório por meio da recomendação de ações ou cursos de ação a quem vai tomar a decisão. Como apontado por Hening e Buchanan (1994), uma boa metodologia de apoio à decisão não explora só as soluções, explora também o decisor, e isto é feito na medida em que auxilia ao decisor explicitando suas preferências.

Também não é possível eliminar a subjetividade envolvida no processo decisório, mas o uso de abordagem MCDM permite explicitar esta subjetividade para dar maior transparência à tomada de decisão (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2002; GOODWIN; WRIGHT, 2005).

Segundo Goodwin e Wright (2005), o maior benefício que o tomador de decisões pode obter ao utilizar uma análise de decisão multicritério é facilitar seu aprendizado e entendimento sobre o problema, suas prioridades e objetivos. Uma vez estruturado esses elementos, a metodologia funciona como guia para auxiliar ao decisor na identificação da melhor ação ou curso de ação.

Por outro lado, pode se afirmado também que o modelo matemático implícito aporta certo grau de objetividade e eficiência à metodologia. Se bem que conceitualmente não existe uma solução ótima ao tratar um modelo multiobjetivo, a ideia radica precisamente em aproveitar isso para avaliar o conjunto de soluções de acordo com múltiplos critérios. A Tabela 5.3 apresenta um resumo da metodologia proposta neste trabalho.

Tabela 5.3 - Resumo da metodologia proposta

N	ETAPA	OBJETIVO	TÉCNICAS
1	Entendimento do problema	Alinhamento sobre a percepção dos decisores em relação ao problema a ser resolvido	Entrevista com decisores estratégicos envolvidos no problema
2	Determinação dos objetivos fundamentais	Construção da árvore de decisão e definição dos critérios para mensuração dos objetivos	Entrevista e questionários para levantar os critérios relevantes, bem como apoio na literatura.
3	Preferências e avaliação das compensações de valor	Elaboração da função de utilidade para cada critério.	Método da certeza equivalente para determinação da curva de utilidade de cada critério
4	Hierarquização dos critérios	Obtenção das ponderações dos critérios	AHP para determinação das ponderações
5	Determinação das alternativas	Geração de possíveis alternativas.	Modelo matemático de programação multiobjetivo e soluções empíricas dos decisores
6	Avaliação de cada alternativa	Valor de utilidade de cada alternativa e o valor global	Aplicação do modelo de utilidade global em função de pesos definidos e as funções de utilidade de cada critério
7	Análise de sensibilidade	Verificação da aderência da solução provisória	Variação nos pesos, técnicas e funções de utilidade.
8	Recomendação de curso de ação	Recomendação da alternativa a ser selecionada.	Verificação da análise de sensibilidade

6. AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA: O CASO DE UMA EMPRESA DE TELECOMUNICAÇÕES

Este capítulo tem como propósito principal avaliar a metodologia proposta por meio de um caso real em uma empresa no setor das telecomunicações. O modelo matemático proposto no capítulo 4 também é baseado nas operações logísticas desta empresa.

Os dados para as etapas de ponderação de critérios, desenhos das curvas de utilidade e análises de sensibilidade, foram coletados através de questionários e entrevistas (Apêndice E) feitas para decisores estratégicos envolvidos no problema.

Este capítulo segue a mesma sequência apresentada na proposta metodológica.

6.1 Implementação: entendimento do problema e classificação

A empresa do estudo pertence ao ramo de atividade das telecomunicações com cobertura por todo o território brasileiro. Trata-se de uma empresa de grande porte¹ com capital fechado. O seu serviço de transporte é totalmente terceirizado, sendo que uma grande porcentagem da carga transportada é destinada a um operador logístico (3PL). Portanto, esta pesquisa toma como base as operações de transporte gerenciadas pelo 3PL. Neste sentido, considera-se a tabela de fretes deste 3PL para ambas alternativas de transporte (FTL e LTL).

Devido à baixa densidade dos equipamentos transportados (antenas, decodificadores, receptores, cabos, entre outros), na maior parte dos casos o tipo de carga é definido pelo peso cubado². Trata-se de cargas dispostas em embalagens, com alto valor agregado, frágeis e secas. Deste modo, riscos sofridos durante o transporte como avarias e extravios são altamente propensos.

No sistema de distribuição da empresa convém identificar e analisar o relacionamento entre três participantes chaves: embarcador, operador logístico e transportador. Na primeira instância, a empresa embarcadora contrata os serviços de transporte e armazenamento do operador logístico. Baseado no planejamento feito pelo embarcador e através de vários centros de distribuição próprios, o 3PL faz a gestão da distribuição até os centros de distribuição regionais do embarcador. Dentro de outros serviços contratados encontram-se a

¹ Baseado na classificação do SEBRAE, por número de funcionários:

- Microempresa: Até 9 funcionários (serviços e comércio) ou até 19 (indústria);
- Pequena: Entre 10 e 49 funcionários (serviços e comércio) ou entre 20 e 99 (indústria);
- Média: Entre 50 e 99 funcionários (serviços e comércio) ou entre 100 e 499 (indústria);
- Grande: Mais de 99 funcionários (serviços e comércio) ou mais de 499 (indústria);

² Carga por peso cubado: Modalidade pela qual será cobrado o valor do transporte. O valor é cobrado de acordo com o peso da mercadoria ou o espaço (volume) que ela ocupar, sempre o que for maior.

conformação do produto final e parte da logística reversa. Desta forma, o 3PL recebe diretamente dos fornecedores os equipamentos individuais para a conformação do produto final (Kits de equipamentos). A logística reversa refere-se à coleta dos kits avariados, desatualizados ou de contratos finalizados, que são incluídos ao estoque do operador para reparo ou redistribuição. Atividades de logística reversa não fizeram parte desta pesquisa.

Para a carga fracionada, o transporte é feito unicamente através do 3PL. Neste caso, uma tabela de fretes anuais é definida e fixada em função do volume, distância, custos de pedágio e outros fatores econômicos. Os preços de cada veículo dedicado são prefixados entre embarcador e 3PL, porém transportadoras podem oferecer preços mais baixos e o embarcador pode optar por essas alternativas. Neste último caso, os veículos dedicados coletam os produtos no CD do 3PL e o transportam até os respectivos CD regionais.

Vale advertir que na maior parte dos casos, especialmente para cargas fracionadas, operador logístico é o encarregado do transporte. Adverte-se também que nesta dissertação a tomada de decisão foi estudada desde a perspectiva do embarcador. Portanto, foram analisadas as preferências do embarcador pelo uso de carga completa ou fracionada.

Atualmente a empresa fundamenta o planejamento do sistema de distribuição em dois objetivos fundamentais: baixos custos de frete e rapidez na entrega. A carga fracionada (LTL) é uma alternativa de baixo custo no transporte, e a carga completa (FTL) é uma alternativa de rápida resposta. Deste modo, quando a carga fracionada é adequada para satisfazer uma entrega no tempo desejado, então é motivada pelo baixo custo de frete. Unicamente para as demandas que devem ser entregues com urgência, a alternativa de transporte de carga completa é preferida. Portanto, no sistema atual da empresa, aproximadamente 80% da demanda dos clientes é transportada como carga fracionada e o restante como carga completa.

Para um bom delineamento do problema foram necessárias várias reuniões com os decisores e demais gestores e operadores das áreas envolvidas. Cerca de dez (10) encontros foram necessários para o levantamento formal e para a realização das etapas restantes. Visitas para observação direta em um dos grandes centros de distribuição também foram realizadas. As seguintes proposições representam a formulação formal do problema:

- Deseja-se saber a distribuição da demanda entre as alternativas de transporte de carga disponíveis (FTL e LTL). Em outras palavras, definir a quantidade de mercadoria enviada a partir de cada CD e para cada cliente através de FTL e LTL.
- Deseja-se conhecer o nível de estoque de segurança definido para cada cliente (CD regional) de forma a satisfazer o nível de serviço desejado.

As soluções a estas questões devem ser de tal modo que as demandas dos clientes sejam satisfeitas ao menor custo possível. Os decisores consideraram que devido ao caráter estratégico/tático do problema, as operações de roteamento não devem ser consideradas, portanto esses custos não foram assumidos.

6.2 Implementação: determinação dos objetivos fundamentais

Nesta etapa apresentam-se os julgamentos de relevância dos decisores com relação aos critérios apontados pela literatura (seção 5.1).

Gestores estratégicos da organização tiveram parte na definição do problema e na caracterização das variáveis de solução. No entanto, três dos tomadores de decisões (aqui chamados DM1, DM2 e DM3) estiveram disponíveis para responder os questionários e entrevistas (Apêndice E), os perfis deles são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - perfis dos entrevistados

Entrevistados	DM1	DM2	DM3
Idade	26	26	34
Cargo	Supervisor em logística	Analista sênior em distribuição	Supervisor em logística
Experiência	3 anos em logística e distribuição	2 anos em logística e distribuição	9 anos em logística e cadeia de suprimentos.
Supervisa	5 pessoas na área	-	-
Principias Funções	Gestão dos fretes e custos atrelados. Gerenciamento de inventários. Pagamento e reembolsos para os operadores logísticos.	Planejamento da distribuição de insumos e equipamentos.	Gerenciamento do transporte. Gestão da distribuição de insumos e equipamentos.

Todos os entrevistados reportam para o gerente de logística e distribuição, e tomam parte no problema. Eles não estão de acordo com o método atual de planejamento da distribuição e acreditam que um modelo, composto por medidas bem definidas e considerando as preferências dos decisores, poderia melhorar o desempenho do sistema.

A Tabela 6.2 apresenta as pré-avaliações de relevância realizadas pelos entrevistados para cada critério em uma escala de cinco pontos. Sendo 1 - Irrelevante; 2 - Pouco relevante; 3 - Relevante; 4 - Muito relevante; 5 - Imprescindível. A média (\bar{X}) destas avaliações provê um indício da preferência grupal.

Após os julgamentos de relevância, foi observado que os critérios "Serviços de distribuição internacional" e "Capacidade para transportar produtos especiais" foram pouco

relevantes para os decisores, obtendo médias inferiores a três (3,0). A justificativa a estas avaliações fundamenta-se em que a cobertura do serviço é nacional, e o produto transportado não requer de manuseio especial. Portanto, estes dois critérios foram excluídos das análises.

Tabela 6.2 - Avaliação da relevância dos critérios ou objetivos fundamentais

Nº	CRITÉRIOS	ABREV	DM1					DM2					DM3					\bar{X}
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
1	Custo de transporte	CTRANSP					x					x					x	5.0
2	Custo de manutenção de estoque	CESTOQ					x					x					x	4.7
3	Custo de estoque em trânsito	C.EST-TR				x						x					x	4.7
4	Velocidade do transporte (tempo em trânsito)	VELOCD					x					x					x	4.7
5	Confiabilidade do tempo em trânsito	CONFIAB					x					x					x	5.0
6	Serviço de coleta confiável	COLETA					x					x					x	4.3
7	Baixo erro de entrega	ENTREGA					x					x					x	4.3
8	Frequência de serviço	FREQ					x					x					x	4.7
9	Capacidade de prestar serviços que não danificam bens em trânsito	SEGURAC					x					x					x	4.0
10	Histórico de desempenho do transporte	HISTORICO					x					x					x	4.0
11	Resposta rápida em situações de emergência	RESPOSTA					x					x					x	4.7
12	Cobertura geográfica do transporte e acesso	ACESSO					x					x					x	4.7
13	Serviços de documentação e faturamento	FATURA					x					x					x	4.7
14	Qualidade do pessoal de transporte	QPESAOAL					x					x					x	4.3
15	Cooperação entre o transportador e carregador	COOPER					x					x					x	4.3
16	Comunicação frequente com o transportador	COMUNIC					x					x					x	4.3
17	Serviços de distribuição internacional	INTERN	x					x					x					1.3
18	Tecnologia de informação	TI					x					x					x	5.0
19	Facilidade para fazer mudanças em embarques expedidos	MUDANÇ					x					x					x	3.7
20	Programações flexíveis	PRG-FLEX					x					x					x	4.3
21	Limitações de capacidade da carga	CAPAC					x					x					x	4.7
22	Facilidade nas operações de carga e descarga	CARG/DESC					x					x					x	4.7
23	Rastreamento do embarque	RASTR					x					x					x	4.7
24	Capacidade para transp. produtos especiais	TRANSP-ESP	x					x					x					2.3
25	Compatibilidade das estratégias	COMPAT					x					x					x	3.7
26	Possib. de relacionamento em longo prazo	RELAC					x					x					x	4.3
27	Taxas flexíveis	TAX-FLEX					x					x					x	4.0

Fonte: Dados da pesquisa

Os entrevistados também aludiram que "Histórico de desempenho do transporte" e "Reputação pela qualidade do serviço" são critérios redundantes. Como indicado pelos decisores, o histórico de desempenho do modo de transporte é o que define a reputação desse serviço. Seguidamente estes critérios foram considerados como sendo semelhantes. Por simplicidade foi usado o critério de nome "Histórico de desempenho do transporte", e "Reputação pela qualidade do serviço" foi excluído da análise. De forma similar, os critérios "Possibilidade de perda e dano" e "Cuidado e limpeza" foram considerados semelhantes. Um critério mais geral foi definido com objetivo de evitar sobrevalorações. Assim, foi usado para futuras análises "Capacidade de prestar serviços que não danificam bens em trânsito".

Finalmente, a Tabela 6.3 apresenta a árvore de decisão resultante considerando a classificação sugerida por Coulter et al. (1989). Entende-se como objetivo geral do problema, a seleção do modo de transporte de carga para melhorar o desempenho geral do sistema. Em acordo com os decisores, este desempenho pode ser explicado pelo conjunto de critérios apresentado na tabela. Nenhum critério adicional foi sugerido pelos entrevistados.

Tabela 6.3 - Árvore de decisão para o Caso de estudo

Critérios	Critérios nível 2	Critérios nível 3
Custos Relevantes		
		Custo de transporte Custo de manutenção de estoque Custo de estoque em trânsito
Qualidade do serviço/Benefício		
	Eficiência Operacional	Velocidade do transporte Confiabilidade de tempo de trânsito Serviço de coleta confiável Baixo erro de entrega Frequência de serviço
	Segurança na Prestação de Serviços	Segurança da carga Histórico de desempenho no transporte de carga Resposta rápida em situações de emergência Cobertura geográfica do transporte e acesso Serviços de documentação e faturamento
	Atendimento ao Cliente	Qualidade do pessoal de transporte Cooperação do pessoal de transporte Comunicação frequente com o transportador Tecnologia de informação
	Fator de Manipulação e Manuseio	Facilidade para fazer mudanças em cargas expedidas Programações flexíveis Limitações de capacidade da carga Facilidade de operações de carga e descarga Rastreamento do embarque
	Fator Personalização	Compatibilidade das estratégias Possibilidade de relacionamento em longo prazo Taxas flexíveis

A classificação sugerida por Coulter et al. (1989) foi obtida pelos autores através de análise discriminante, considerando uma extensa lista de critérios e uma grande amostra de empresas embarcadoras. Portanto a classificação foi aqui considerada. No entanto, autores têm proposto outras classificações também válidas (LU, 2003; MOHAMMADITABAR; TEIMOURY, 2008).

6.3 Implementação: preferência e compensação das compensações de valores

Esta etapa é, talvez, a que demanda maior participação dos decisores. Ela consistiu em definir a estrutura de cada critério (indicadores e funções) considerando a aversão ao risco e as preferências intrínsecas dos decisores. A etapa foi realizada através de entrevistas auxiliadas por um questionário (Apêndice E).

Inicialmente, foi pedido para os decisores definirem indicadores para cada critério em análise. Como mencionado anteriormente, nem todos os critérios são suscetíveis de uma medição objetiva, o que dificulta encontrar indicadores que possam ser generalizados, pois podem ser próprios e diferentes para cada organização. Galo (2014) realizou um estudo multicaso, sobre um operador logístico e quatro embarcadoras de grande porte, com objetivo de levantar indicadores para os critérios de avaliação de desempenho logístico e seleção de fornecedores. O autor encontrou que indicadores diferentes são utilizados para mensuração de um mesmo critério, pois estes indicadores podem ser dependentes do tipo de organização, das características do produto e do setor.

A Tabela 6.4 apresenta os indicadores e unidades de medidas sugeridas pelos entrevistados em consenso para os critérios definidos como quantitativos. A descrição e a forma como os dados são obtidos também são apresentadas.

Tabela 6.4 - Indicadores definidos para os critérios em análise

Critérios	Indicadores [unidades]	Descrição
Custo de transporte	Custo [R\$]	Custo de transporte do produto em função da carga e cidade destino. Definido na tabela de fretes FTL e LTL estabelecida com o transportador.
Custo de manutenção de estoque	Custo [R\$]	Diz sobre o custo ou valor do estoque fixo mantido em cada cliente (CD regional).
Custo de estoque em trânsito	Custo [R\$]	Diz sobre o custo ou valor do estoque em trânsito que é transportado para cada cliente.
Velocidade do transporte	<i>Leadtime</i> [dias]	Está relacionado ao tempo médio de entrega realizado para cada cidade. Valor obtido da base de dados para controle da empresa.
Confiabilidade do tempo em trânsito	Desvio padrão do <i>leadtime</i> [dias]	Está relacionado com o as diferenças entre os tempos das entregas realizadas e o tempo médio da entrega ou tempo acordado. Valor obtido da base de dados para controle da empresa.

Fonte: Dados da pesquisa

Para cada um dos critérios, curvas de utilidade foram desenhadas. Estas funções permitiram medir a preferência dos decisores de uma alternativa sobre outra e em relação a cada critério. As curvas foram desenhadas através do método da certeza equivalente.

A Figura 6.2 apresenta a curva de utilidade para o "Custo de transporte". Mudanças de igual magnitude no domínio da curva não têm sempre o mesmo impacto na utilidade. Estas curvas são definidas como curvas de utilidade de caráter não linear. Observa-se, por exemplo, que uma variação no custo de transporte anual de R\$1,5×10⁶ para R\$7×10⁶ gera uma perda de utilidade aproximada de 20 unidades (de 100 para 80), enquanto uma variação de R\$7,1×10⁶ para R\$12,6×10⁶ gera uma perda de utilidade de 80 unidades. Este comportamento reflete a natureza evasiva de riscos dos decisores. A Tabela 6.5 apresenta os valores de custo e a sua utilidade equivalente, bem como a função de utilidade aproximada em função do custo.

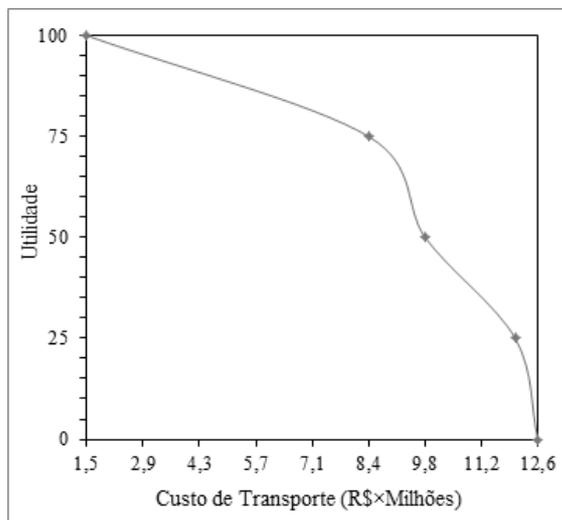


Figura 6.1 - Função de utilidade: Custo de transporte

Tabela 6.5 - Utilidade para os custos de transporte

Utilidade $f(x)$	Valor de Custo (x)
0	$x \geq \text{R\$ } 12.600.000$
25	R\$ 12.045.000
50	R\$ 9.825.000
75	R\$ 8.437.500
100	$x \leq \text{R\$ } 1.500.000$

Função aproximada ($0 \leq f(x) \leq 100$)

$$f(x) = \begin{cases} -4 \times 10^{-6}x + 105,41 & x \leq 8.437.500 \\ 2 \times 10^{-12}x^2 - 6 \times 10^{-5}x + 398 & x \leq 12.322.500 \\ -9 \times 10^{-5}x + 1135 & x > 12.322.500 \end{cases}$$

A Figura 6.3 apresenta a curva de utilidade para o critério "Velocidade do transporte". A Tabela 6.6 apresenta os valores de utilidade para *lead time* da rede. Este valor indica, em média, o tempo que a demanda semanal do cliente tarda em ser atendida.

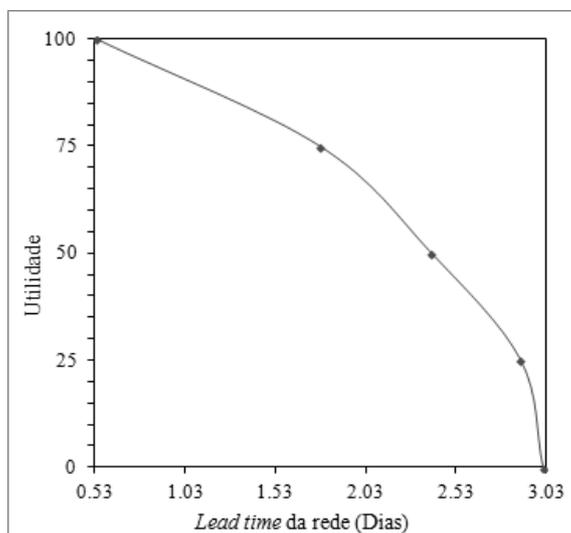


Figura 6.2 - Função de utilidade: Vel. do transporte

Tabela 6.6 - Utilidade para o *lead time* da rede

Utilidade $f(x)$	Lead time médio da rede (x)
0	$x \geq 3,0$ dias
25	2,89 dias
50	2,39 dias
75	1,78 dias
100	$x \leq 0,54$ dias

Função aproximada ($0 \leq f(x) \leq 100$)

$$f(x) = -12,103x^3 + 50,448x^2 - 84,739x + 133,04$$

As demais funções de utilidade para os critérios quantitativos restantes são apresentadas no Anexo B.

Por outro lado, a maior parte dos critérios foi considerada, pelos entrevistados, como de caráter qualitativo. Estes critérios possuem certo grau de subjetividade, portanto, torna-se mais difícil encontrar indicadores adequados para mensurá-los. Para estes critérios é necessário definir também curvas de utilidades. No entanto procura-se avaliar o desempenho de alternativas diretamente sobre cada critério e não através de indicadores. Os entrevistados consideraram que uma escala qualitativa de 5 pontos pode ser favorável para avaliar diretamente o desempenho das alternativas. A Tabela 6.7 apresenta a escala, bem como a utilidade atribuída a cada ponto por parte dos decisores. Funções de utilidade foram construídas para os critérios qualitativos através desta escala e através das valorações diretas dos entrevistados.

Tabela 6.7 - Escalas qualitativas utilizadas no caso exemplo

Escala	Utilidade
Ruim	0
Pobre	25
Normal	50
Bom	75
Ótimo	100

A Figura 6.4 apresenta a curva de utilidade para o critério "Baixo erro de entrega". Esta curva foi desenhada ao questionar aos decisores sobre o desempenho das alternativas (100% FTL, 50% FTL e 100% LTL) com relação ao critério. Os entrevistados indicaram, que a alternativa de transportar 100% da demanda com carga completa implica um ótimo desempenho com relação ao baixo erro de entrega, dedicar 50% convêm a um desempenho normal e fracionar 100% reflete em um pobre desempenho. Isto explicado devido a que na carga completa, os veículos são enviados diretamente para os CD regionais. Desta forma a quantidade, lugar e prazo de entrega são conferidos no CD e a carga se mantém intacta até chegar ao destino. Porém, no transporte fracionado, a carga é manuseada várias vezes juntamente com demandas de outros clientes até chegar ao destino. Embora o índice de entrega errônea no sistema atual seja baixo, o modo de transporte de carga fracionada é mais propenso a este tipo de equivocação.

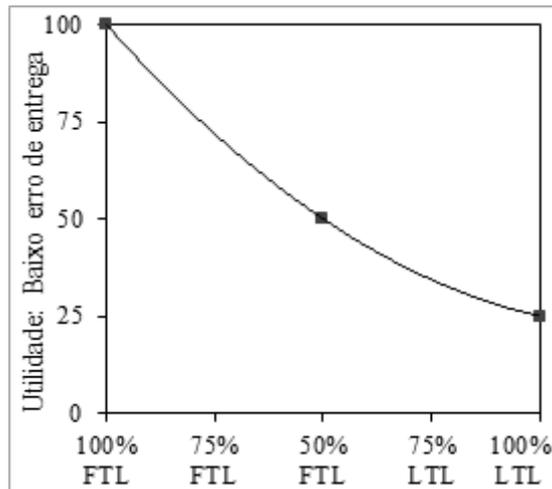


Figura 6.3 - Função de utilidade do critério: Baixo erro de entrega

Desde o ponto de vista da utilidade, a Figura 6.4 basicamente indica que uma alta porcentagem de carga completa fornece um melhor comportamento com relação a um baixo erro de entrega e, portanto, tem maior preferência. No entanto este comportamento não é linear, devido a que uma mudança na porcentagem de carga dedicada/fracionada afeta não proporcionalmente à preferência. Uma diminuição da carga dedicada de 100% para 50% reduz a preferência em 50%, no entanto uma diminuição da carga dedicada de 50% para 0% reduz a preferência em apenas 25%.

As Figuras 6.5 e 6.6 apresentam as funções de utilidade para os critérios "Serviço de coleta confiável" e "Frequência do serviço". Cargas completas fornecem maior confiabilidade para coleta, pois a empresa embarcadora pode definir a data/hora de coleta a conveniência e sem as restrições de cronograma habituais na carga fracionada. Em outras palavras, a coleta na carga fracionada está condicionada à coleta nos outros clientes, de forma que um atraso ocasionado pelo cliente anteriormente visitado pode desencadear um atraso para o embarcador. Entretanto, carregamentos fracionados implicam maior disponibilidade para serem usados. Isto pode ser explicado com a oportunidade, relativamente maior, de achar capacidade para transportar uma remessa de mercadoria, em relação à oportunidade de dispor de caminhão completo. Adicionalmente, para o transporte de carga completa através do 3PL existe um limite horário para o qual a carga pode ser solicitada. Neste sentido, se o embarcador precisa de veículos dedicados deve informar ao 3PL no mínimo com 15 horas de antecipação ou dispor dos serviços de outras transportadoras.

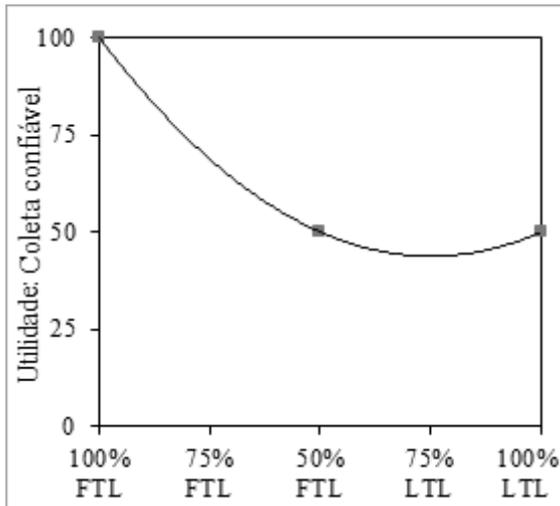


Figura 6.4 - Função de utilidade do critério: Serviço de coleta confiável

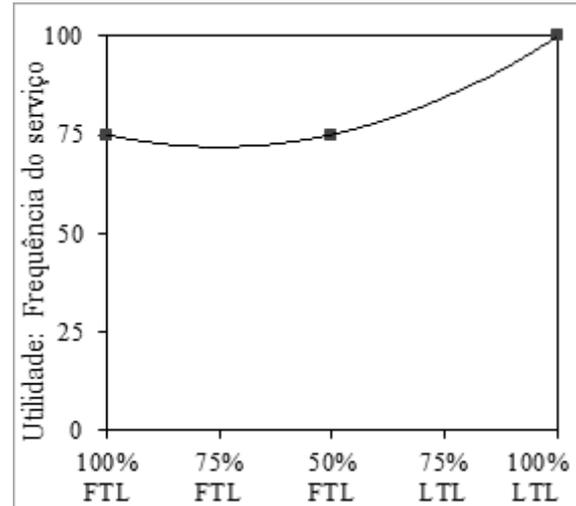


Figura 6.5 - Função de utilidade do critério: Frequência do serviço

Para o critério "Capacidade de prestar serviços que não danificam bens em trânsito", os decisores indicaram que a carga completa fornece melhor desempenho. No caso da carga fracionada, os produtos são manipulados e transferidos muitas vezes desde a coleta até a entrega, sendo este modo de transporte de carga mais suscetível à perda, dano ou entrega dos produtos em condições não desejadas. Em relação ao critério "Taxas flexíveis", os decisores consideraram que a tabela de frete fracionado é mais rígida e menos suscetível de modificações. Esta tabela é definida e fechada por BID's³ anuais com o 3PL e transportadoras contratadas. Para o transporte de carga completa, embora exista uma tabela pré-definida, o frete ou preço de um veículo é definido por cotações pontuais, no jogo da oferta e a demanda. Desta forma existe maior disposição para negociar a tabela de fretes da carga completa.

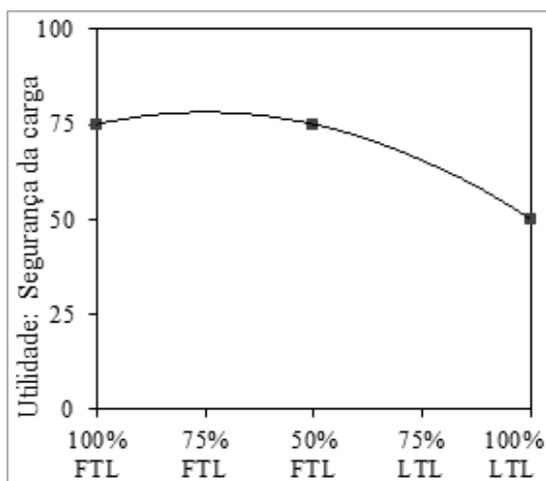


Figura 6.6 - Função de utilidade do critério: Cap. de prestar serviços que não danificam bens

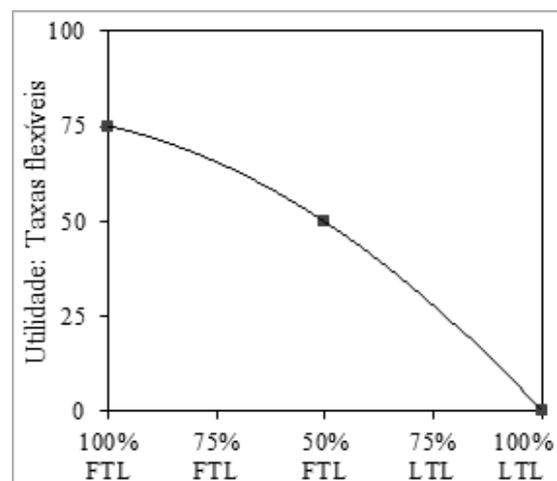


Figura 6.7 - Função de utilidade do critério: Taxas flexíveis

³ Bid: É o máximo preço em que há comprador no mercado. Se uma indústria quer alugar um veículo a R\$ 17,50 e ninguém paga mais do que ela, o "bid" do mercado é R\$ 17,50.

As funções de utilidade para "Histórico de desempenho" e "Resposta rápida em situações de emergência" são ilustradas nas Figuras 6.9 e 6.10 respectivamente. A carga completa fornece melhor desempenho com relação a ambos os critérios principalmente pelo baixo *lead time* de entrega e a confiabilidade para não ultrapassar os prazos definidos. Observa-se que a preferência para o primeiro critério é de comportamento linear e para o segundo de comportamento não linear. Isto indica que qualquer redução na porcentagem de carga completa terá como resultado uma diminuição proporcional da preferência para o "Histórico de desempenho" e uma diminuição não proporcional da preferência para a "Resposta rápida em situações de emergência". Desta forma o embarcador pode aceitar um baixo desempenho com relação ao histórico de desempenho, mas pode penalizar em maior grau de utilidade os baixos desempenhos com relação à resposta rápida.

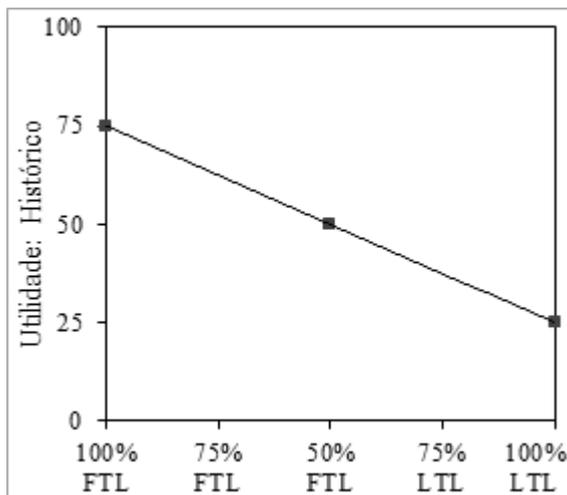


Figura 6.8 - Função de utilidade do critério: Histórico de desempenho

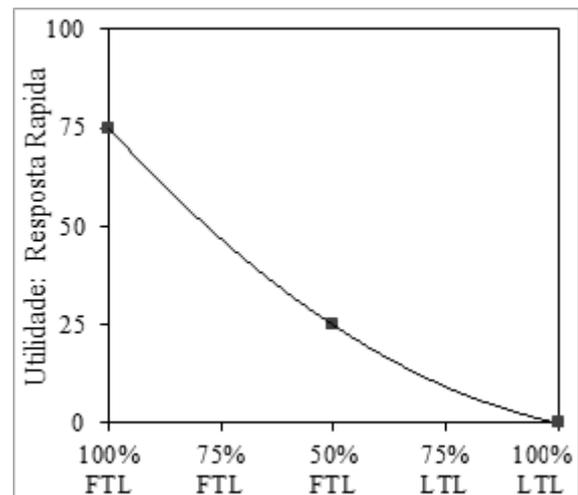


Figura 6.9 - Função de utilidade do critério: Resposta rápida em situações de emergência

Para o critério "Facilidade de fazer mudanças em embarques expedidos" em ambos os casos os decisores apontaram que as mudanças só podem ocorrer antes da emissão da nota. Portanto, não existem possibilidades de fazer mudanças uma vez que a carga tenha sido expedida. A utilidade para ambas às alternativas é baixa, como apresentado na Figura 6.11. Porém, as cargas fracionadas tem uma maior, mas leve, flexibilidade do ponto de vista de responsabilidade de veículos atribuída ao transportador. Quando a carga é completa, o embarcador "compra" um veículo e desta forma um aumento de volume que impactasse na mudança de tipo de veículo utilizado, implicaria um novo agendamento. Já para um envio fracionado, o operador é pago por quantidade transportada e não existe um limite acordado, podendo assim suportar linearmente estas variações.

Por outro lado, para o critério "Serviços de documentação e faturamento", a carga fracionada implica melhor desempenho devido a que o 3PL é responsável da documentação para o controle, e o faturamento é gerado de forma automática. Para carga completa, a documentação e faturamento devem ser feitos manualmente pela empresa ou pelas diversas transportadoras, aumentando a imprecisão e probabilidade de erro, além de consumir tempo administrativo (Figura 6.12).

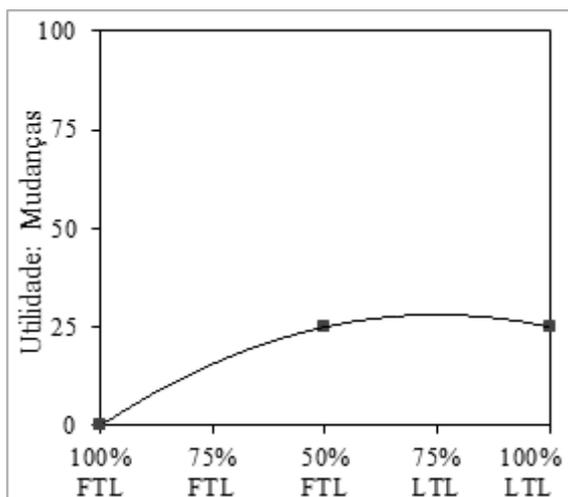


Figura 6.10- Função de utilidade do critério: Mudanças

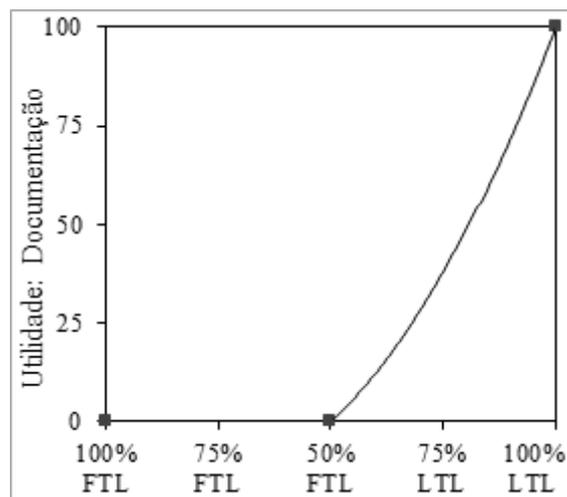


Figura 6.11 - Função de utilidade do critério: Documentação e faturamento

Com relação ao critério "Comunicação frequente com o transportador" os decisores apontaram que existe maior comunicação para o transporte de carga completa. Quando a carga é fracionada, o transporte é realizado exclusivamente via operador logístico. Assim sendo, a carga é monitorada e controlada pelo 3PL uma vez ela é destinada. Entretanto, para o transporte de carga completa, a presença de diferentes empresas transportadoras faz necessária uma constante comunicação entre embarcador e os transportadores em função de garantir um maior controle sobre a carga (Figura 6.13).

Por outro lado, para o critério "Cooperação entre transportador e carregador", os decisores apontaram a existência de maior cooperação quando a carga é fracionada. Quando a carga é fracionada, a responsabilidade e o controle re incidem principalmente sobre o 3PL. Para o transporte fracionado, de fato, operador logístico e transportador são sempre a mesma empresa. Contudo, quando a carga é completa, a responsabilidade e controle recaem sobre as outras transportadoras, para as quais os respondentes avaliaram como tendo menor cooperação e compromisso (Figura 6.14).

Entende-se nestes critérios que existe certa preferência pela empresa na contratação dos serviços prestados pelo 3PL em comparação com os contratados por outras transportadoras. Evidencia-se também a existência de claros objetivos em conflito, sendo que um modo de transporte de carga - por exemplo, o fracionado- pode fornecer baixo custo de frete, maior cooperação com a transportadora, no entanto implicaria menor controle e responsividade. Como ressaltado, a complexidade que implica para os decisores tratar todos estes critérios de forma conjunta é uma motivação desta pesquisa, e a metodologia proposta para agregar estas percepções com a otimização do custo é uma das contribuições aqui alcançadas.

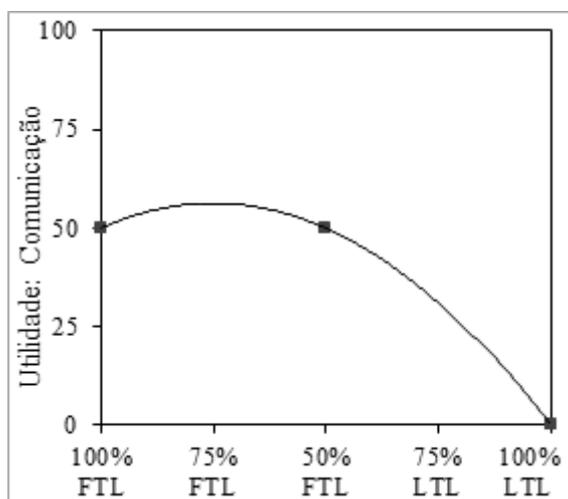


Figura 6.12 - Função de utilidade do critério: Comunicação

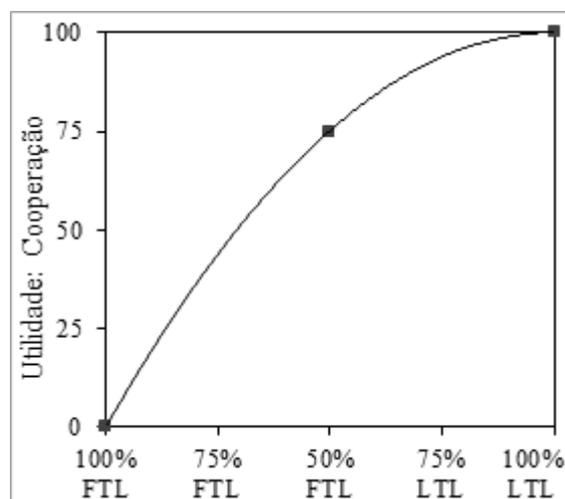


Figura 6.13 - Função de utilidade do critério: Cooperação

As Figuras 6.15 e 6.16 apresentam as funções de utilidade para os critérios "Qualidade do pessoal de transporte" e "Rastreamento da carga". Para ambos os critérios as preferências dos decisores se mantêm constantes. Embora a literatura aponte que os serviços contratados de carga completa impliquem mais comprometimento do transportador, os decisores indicaram que a qualidade do pessoal de transporte não apresenta uma mudança significativa. Importante ressaltar também que o pessoal de transporte pode ser o mesmo para ambas as alternativas, especialmente para os casos em que o transporte de carga completa é feito também pelo 3PL. Para rastreamento da carga, os respondentes também apontaram que existe a mesma facilidade devido a que todos os veículos, independentes do tipo de transporte de carga, são monitorados em tempo real.

Para as 6.14 e 6.15, observa-se que qualquer porcentagem de carga fracionada (ou completa) fornece o mesmo valor de utilidade para estes critérios. Adverte-se que embora os

critérios tenham relevâncias diferentes para o problema, as alternativas aqui consideradas geram o mesmo valor de utilidade. Para casos gerais, outros operadores logísticos ou transportadores poderiam estar disponíveis. Nesses casos, tanto a qualidade do pessoal como o processo de rastreamento da carga poderiam ser diferentes. Critérios deste tipo não afetam na ordenação final das alternativas, contudo afetam no valor final de utilidade global.

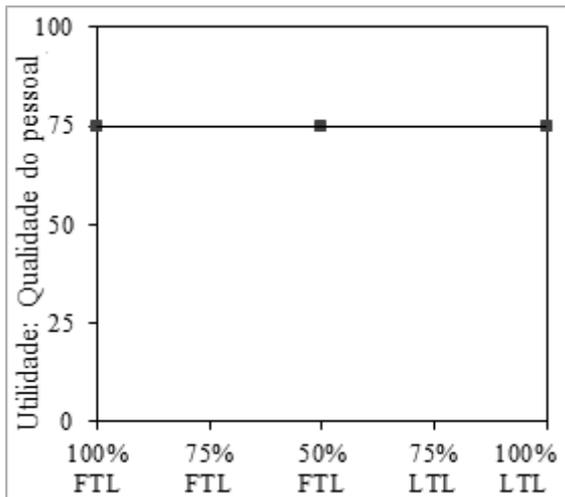


Figura 6.14 - Função de utilidade do critério: Qualidade do pessoal de transporte

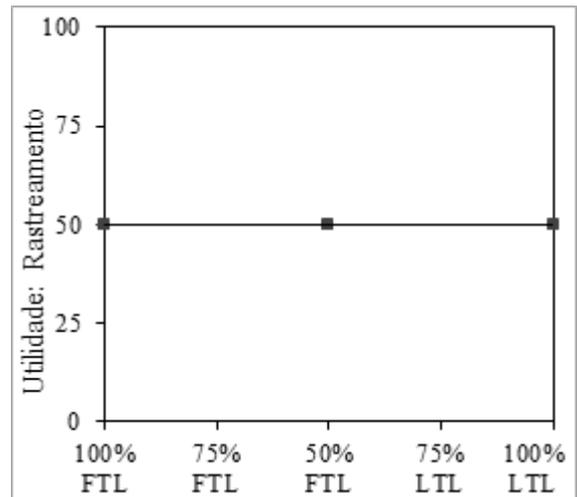


Figura 6.15 - Função de utilidade do critério: Rastreamento da carga

Para o critério "Tecnologia de informação", o desempenho é melhor em cargas fracionadas. Os decisores consideram que a tecnologia de informação de algumas outras transportadoras diferentes do 3PL não é adequada, portanto o modo de transporte de carga completa fornece um baixo desempenho com relação a este critério. Em contraposição, o transporte de carga completa implica um ótimo desempenho no critério "Programações flexíveis". A carga completa permite aos decisores decidirem a hora, data, destino e quantidade de cada envio sem as restrições habituais nos cronogramas das cargas fracionadas. Segundo Costa, Dias e Godinho (2010), a flexibilidade na logística tem várias dimensões que podem ou não ser relevantes para cada situação. Em primeiro lugar, a flexibilidade quanto aos locais em que os produtos podem ser recolhidos e entregues. Outro aspecto refere-se à versatilidade quanto aos produtos que podem ser transportados, sejam de grande ou pequeno tamanho. E outra dimensão diz respeito à disponibilidade quanto aos horários a praticar. Neste caso, a flexibilidade refere-se a esta última dimensão. As duas primeiras não são relevantes devido a que tanto os veículos como as instalações utilizadas para o transporte são os mesmos em ambos os modos de transporte de carga. Observa-se também nas Figuras 6.17 e 6.18, que ambos os critérios possuem um comportamento de preferência linear, portanto qualquer

mudança nas porcentagens da carga tem como resultado uma mudança proporcional na preferência da alternativa.

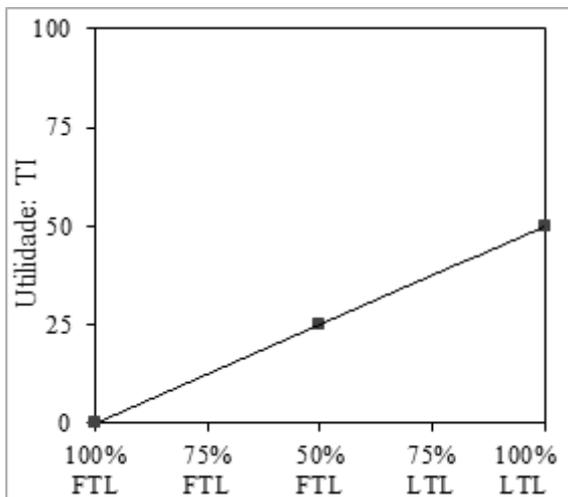


Figura 6.16 - Função de utilidade do critério: Tecnologia de informação

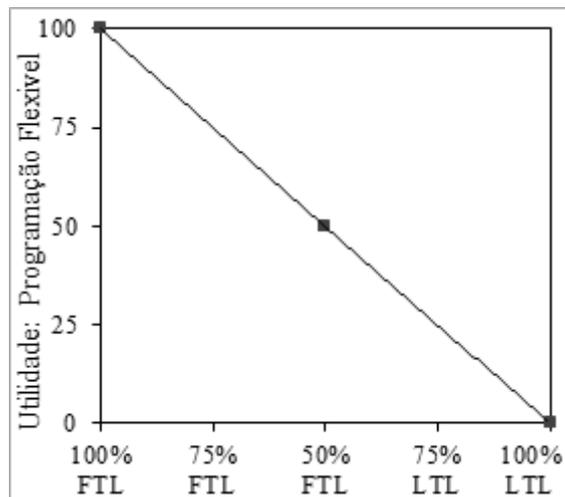


Figura 6.17 - Função de utilidade do critério: Programações flexíveis

As Figuras 6.19 e 6.20 apresentam as funções de utilidade para os critérios "Limitações de capacidade" e "Facilidade nas operações de carga e descarga". Estas preferências indicam que cargas fracionadas possuem menos limitações para as quantidades a serem transportadas, enquanto para cargas completas podem existir restrições ocasionais sobre a capacidade. Em outras palavras existe maior capacidade de carga para fornecer transporte fracionado do que a sua capacidade disponível para a carga completa. Contudo, a carga completa é preferida para as operações de carga e descarga. Para o transporte fracionado, as operações de carga devem ser realizadas no *hub* logístico do operador, onde as mercadorias de diversas empresas e o espaço compartilhado podem dificultar estas operações.

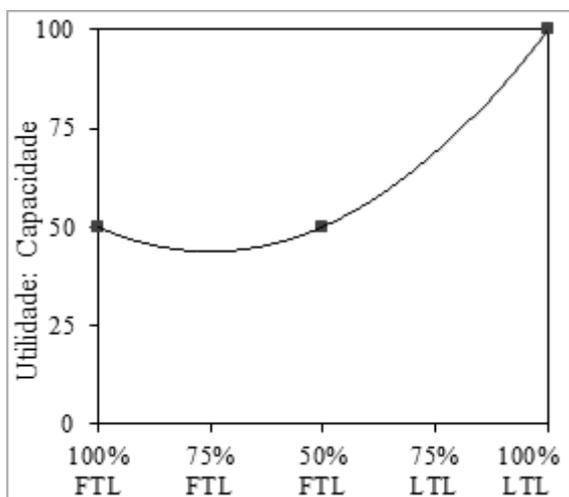


Figura 6.18 - Função de utilidade do critério: Limitações de capacidade

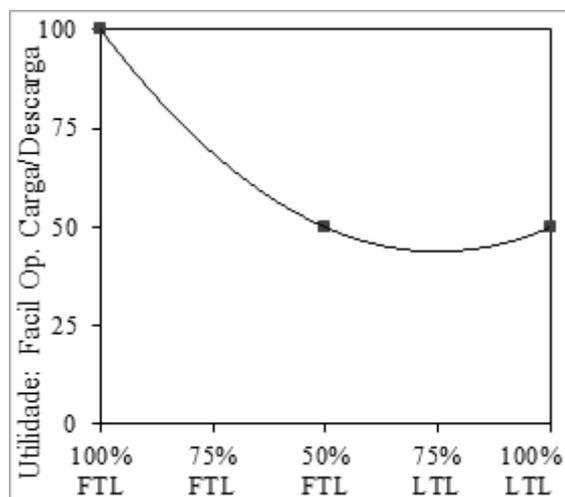


Figura 6.19 - Função de utilidade do critério: Operações de carga e descarga

Para ambos os critérios "possibilidade de relacionamento ao longo prazo" e "compatibilidade das estratégias", a carga completa tem um melhor desempenho. Os decisores consideraram que o transporte de carga completa oferece maior comodidade para os transportadores quem não tem que se preocupar pela conformação de diferentes embarques ou lotação do veículo. Portanto esta decisão pode facilitar estabelecer um relacionamento mais em longo prazo. Este critério busca de alguma forma recompensar o modo de transporte mais conveniente para ambos participantes (embarcador e transportador) ao invés de considerar uma única perspectiva. Em consequência espera-se um melhor relacionamento em longo prazo, manifesto em preços mais acessíveis, modalidades diversas de pagamento, entre outros benefícios.

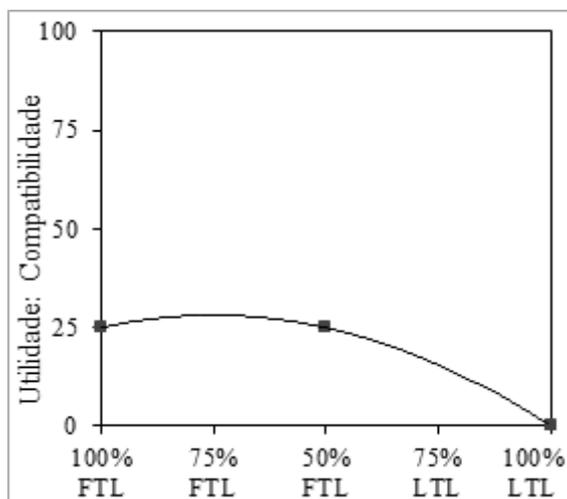


Figura 6.20 - Função de utilidade do critério: Compatibilidade estratégica

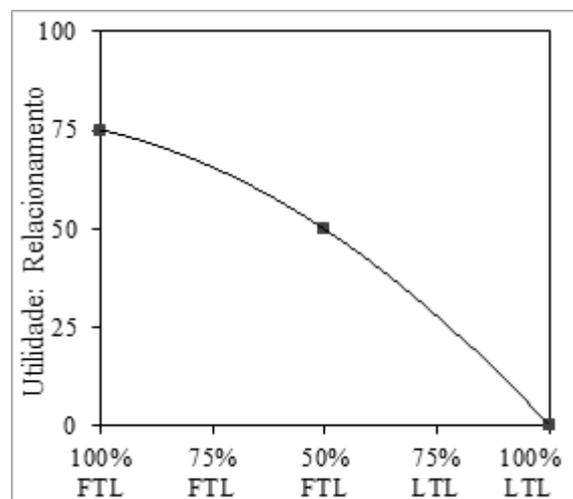


Figura 6.21 - Função de utilidade do critério: Relacionamento ao longo prazo

Finalmente, a Figura 6.23 apresenta a função de utilidade para o critério "Cobertura e acesso". Para cargas fracionadas existe maior facilidade para acessar às grandes cidades, pois a responsabilidade do transporte recai sobre o transportador que é pago em função da quantidade transportada sem considerar restrição alguma. Por outro lado, com carga completa o embarcador deve ainda considerar as restrições de acesso e horários para tráfego dos veículos de grande capacidade nas grandes cidades. Desta forma, considerando o transporte de uma grande remessa para um cliente localizado em uma grande cidade pode resultar na necessidade de utilizar veículos completos de pequenas capacidades. Neste caso, devido à economia de escala, o frete dos pequenos veículos pode sugerir melhor a contratação de um transporte fracionado.

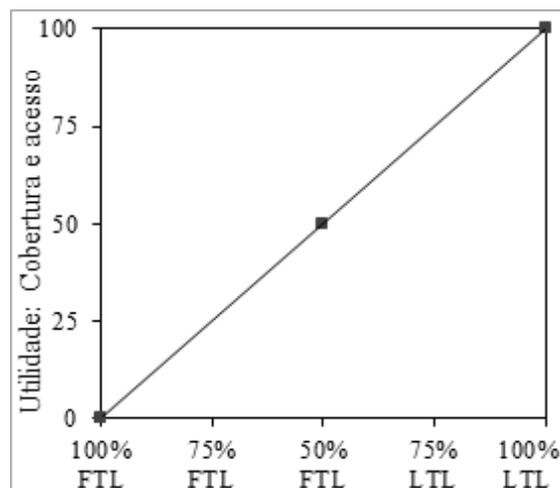


Figura 6.22 - Função de utilidade do critério: Cobertura e acesso

Muitas análises e inferências podem ser feitas sobre as funções de utilidade definidas. Contudo, consumiria ainda mais tempo e esforço. Alguns autores na literatura tentaram também descrever ou explicar os comportamentos para vários dos critérios aqui analisados. Porém entende-se que eles podem mudar para cada setor industrial e mesmo entre empresas da mesma atividade econômica. Estas funções foram desenhadas de forma independente para cada critério e incorporadas finalmente na estrutura decisória.

6.4 Implementação: Hierarquização dos critérios

Nesta etapa, a ponderação dos critérios foi realizada através do método AHP, que permitiu transformar as comparações pareadas em porcentagens e definir os índices de inconsistências dos entrevistados. A técnica de agregação individual de julgamentos (*Aggregation of Individual Judgements- AIJ*) do AHP foi utilizada de maneira a determinar os pesos grupais. Este método utiliza as médias geométricas dos julgamentos individuais para definir os pesos e um índice de inconsistência grupal como adotado em Barboza e Vieira (2014).

A Tabela 6.8 resume os resultados para os julgamentos dos decisores. Apresentam-se os índices de inconsistência geral, bem como os pesos relativos (prioridade local) e pesos finais (prioridade global) dos critérios e subcritérios para cada um dos decisores. Apresentam-se também os pesos agrupados considerando igual relevância para os decisores. As tabelas de julgamentos individual dos decisores são apresentadas no anexo C.

Tabela 6.8 - Pesos relativos e finais para os critérios, Julgamentos individuais

Critérios	DM1		DM2		DM3		AHP-AIJ	
	Pesos R.	Pesos F.						
Custos relevantes	66,7%	66,7%	50,0%	50,0%	66,7%	66,7%	61,4%	61,4%
C. Transporte	34,5%	23,0%	31,1%	15,5%	33,3%	22,2%	34,0%	20,8%
C. Estoque	54,6%	36,5%	49,3%	24,7%	33,3%	22,2%	46,2%	28,4%
C. Est. Trânsito	10,9%	7,2%	19,6%	9,8%	33,3%	22,2%	19,8%	12,2%
Benefício	33,3%	33,3%	50,0%	50,0%	33,3%	33,3%	38,6%	38,6%
<i>Eficiência Operacional</i>	23,3%	7,8%	47,6%	23,8%	26,1%	8,7%	33,0%	12,8%
Velocidade	44,5%	3,5%	33,0%	7,8%	22,7%	2,0%	34,0%	4,3%
Confiabilidade	31,0%	2,4%	30,3%	7,2%	22,7%	2,0%	29,0%	3,7%
Coleta confiável	14,2%	1,1%	13,9%	3,3%	19,7%	1,7%	16,6%	2,1%
Erro de entrega	7,4%	0,6%	20,2%	4,8%	19,7%	1,7%	15,3%	2,0%
Frequência	2,9%	0,2%	2,7%	0,6%	15,2%	1,3%	5,1%	0,7%
<i>Segurança na prestação</i>	13,2%	4,4%	19,1%	9,6%	32,3%	10,8%	21,9%	8,5%
Segurança da carga	8,5%	0,4%	13,6%	1,3%	35,7%	3,8%	16,8%	1,4%
Histórico	39,6%	1,7%	19,3%	1,8%	16,1%	1,7%	24,6%	2,1%
Responsividade	19,3%	0,8%	17,5%	1,7%	16,1%	1,7%	18,6%	1,6%
Cobertura/ acesso	14,3%	0,6%	21,8%	2,1%	17,8%	1,9%	18,9%	1,6%
Documentação	18,4%	0,8%	27,8%	2,7%	14,4%	1,5%	21,1%	1,8%
<i>Atendimento ao cliente</i>	48,5%	16,2%	23,9%	11,9%	17,4%	5,8%	29,2%	11,3%
Qualidade pessoal	24,0%	3,9%	24,6%	2,9%	33,3%	1,9%	29,2%	3,3%
Cooperação	15,2%	2,5%	21,0%	2,5%	23,5%	1,4%	21,2%	2,4%
Comunicação	8,5%	1,4%	24,6%	2,9%	30,6%	1,8%	20,4%	2,3%
T.I.	52,3%	8,5%	29,8%	3,6%	12,5%	0,7%	29,1%	3,3%
<i>Fator manipulação</i>	7,7%	2,6%	3,4%	1,7%	13,1%	4,4%	7,3%	2,8%
Mudanças	6,0%	0,2%	17,5%	0,3%	25,5%	0,9%	14,7%	0,4%
Prog. Flexíveis	20,9%	0,5%	16,9%	0,3%	24,2%	1,1%	22,9%	0,6%
Capacidade	16,7%	0,4%	9,9%	0,2%	20,8%	0,9%	16,6%	0,5%
Op. carga/descarga	9,0%	0,4%	9,4%	0,2%	13,9%	0,6%	11,2%	0,3%
Rastreamento	47,4%	1,2%	46,3%	0,8%	15,5%	0,7%	34,7%	1,0%
<i>Fator personalização</i>	7,3%	2,4%	6,1%	3,0%	11,2%	3,7%	8,5%	3,3%
Compatibilidade	24,9%	0,6%	25,0%	0,8%	55,0%	2,0%	34,5%	1,1%
Relacionamento LP	15,7%	0,4%	25,5%	0,8%	21,0%	0,8%	21,5%	0,7%
Taxas flexíveis	59,4%	1,4%	50,0%	1,5%	24,0%	0,9%	44,0%	1,4%
Inconsistência geral:		4%		5%		3%		2%

Da Tabela 6.8, para o primeiro decisor observa-se preferência do custo em relação ao benefício. O respondente ressalta a importância dos baixos níveis de estoque e a preocupação pelo cliente. Segundo este decisor, o benefício baseia-se em um bom atendimento ao cliente e, em seguida, este atendimento é grandemente explicado por uma boa tecnologia de informação e a cooperação entre embarcador e operador. O decisor atribuiu baixa relevância para os critérios de manipulação (ou manuseio) e personalização. Portanto, critérios como "Facilidade para realizar mudanças em embarques expedidos", "Compatibilidade estratégica",

"Possibilidade de relacionamento em longo prazo" foram critérios que os decisores avaliaram com baixa relevância para o desempenho do serviço.

O segundo decisor, diferentemente do primeiro, atribuiu a mesma importância para custo e benefício. Este respondente ressaltou a importância dos baixos custos de transporte e manutenção de estoque. Em relação ao benefício, ressaltou a relevância da eficiência operacional. Segundo ele, esta eficiência é na maior parte representada pela velocidade e confiabilidade do tempo em trânsito. Por outro lado, o respondente deu pouca importância aos critérios de manipulação. Assim, para este decisor, os critérios "Facilidade nas operações de carga e descarga" e "Limitações de capacidade da carga" foram pouco importantes para explicar o desempenho do sistema de distribuição.

O terceiro decisor avaliou o custo como o mais importante em relação ao benefício. No entanto, o decisor preocupa-se na mesma medida para os baixos níveis de estoque, para manutenção e em trânsito, e para os baixos custos de transporte. Em relação ao benefício, o decisor ressaltou a importância da segurança na prestação serviço. Este decisor preocupa-se principalmente pelo fornecimento de um serviço de baixo risco para os clientes, principalmente explicado pela capacidade de fornecer um serviço sem danificar os produtos. Em contrapartida deu pouca relevância para os critérios "Facilidade nas operações de carga e descarga" e "Tecnologia de informação".

Em relação aos julgamentos agrupados, foi observada a preferência pelo custo em relação ao benefício. Segundo esta ponderação, um baixo custo geral representa um bom desempenho do sistema em pelo menos 61,4% das vezes. Desta forma, o benefício explica 38,6% do desempenho do sistema. Para os custos envolvidos, as ponderações da Tabela 6.8 demonstraram a prioridade dos decisores para manter baixos níveis de estoque.

Relativo ao benefício, o critério de primeiro nível "Eficiência Operacional" obteve a maior prioridade, com uma ponderação relativa ao benefício de 33%. Isto indica que os decisores estão dispostos a dar maior valor para aquelas soluções que forneçam um melhor desempenho nas operações básicas do transporte em procura de garantir a eficácia e eficiência. Particularmente, a velocidade e confiabilidade do tempo em trânsito obtiveram as maiores relevâncias.

Após a eficiência operacional, o segundo critério do benefício mais priorizado foi "Atendimento ao cliente". Entende-se que os decisores estejam interessados em aquelas alternativas com capacidade de garantir também frequente comunicação e cooperação com o operador, além de uma boa tecnologia de informação para maior agilidade nos processos.

Em geral os critérios menos relevantes foram os relacionados com a personalização e a manipulação dos serviços. Deste modo, os decisores podem não dar muita importância para aquelas soluções que forneçam a possibilidade de relacionamento ao longo prazo, que facilitem as operações de carga e descarga ou que permitam realizar mudanças em embarques expedidos. No entanto, a atitude do operador para negociar descontos nas taxas (taxas flexíveis) foi positivamente avaliada.

Sobre os critérios relacionados com a segurança na prestação de serviços, foi observada uma paridade na relevância deles. O critério melhor avaliado foi "histórico de desempenho" e o menos relevante entre eles, "capacidade de prestar serviços que não danifiquem bens em trânsito". No entanto a diferença foi apenas de 0,7% na escala geral de preferência.

De forma similar a outros trabalhos encontrados na literatura, além do custo, outros critérios foram também importantes. No trabalho de Jerman, Anderson e Constantin (1978), os critérios "Cooperação entre o pessoal do transportador e carregador" e "Velocidade do transporte (tempo em trânsito)", foram colocados no topo do ranking. Nesta dissertação, ambos os critérios estiveram entre os mais importantes. Também foram "Confiabilidade do tempo em trânsito" e "Serviço de coleta confiável", assim como apontado por Coulter et al. (1989). No trabalho de Voss et al. (2006), "Confiabilidade do tempo em trânsito" e "Histórico de desempenho do transporte (reputação)", mostraram grande relevância. Por outro lado, critérios como "Limitações de capacidade da carga" e "Capacidade de prestar serviços que não danificam bens em trânsito" que nesta dissertação não foram priorizados pelos decisores, demonstraram ser muito relevantes para outras pesquisas (DANIELIS; MARCUCCI; ROTARIS, 2005; LU, 2003). Afinal, a maior parte das pesquisas, assim como neste trabalho, o critério "Custo" recebeu maior atenção por parte dos decisores.

A respeito das inconsistências entre os julgamentos, todos os respondentes obtiveram índices aceitáveis. Como sugerido por Saaty (2008), índices de inconsistência menores a 10% refletem a coerência das respostas dos respondentes e agrega maior confiabilidade a seus resultados. O segundo decisor apresentou o maior dos índices de inconsistência, de apenas 5%, portanto pode-se supor que os seus julgamentos foram pouco menos coerentes com relação aos outros respondentes. Para os julgamentos agrupados, o índice de inconsistência foi ainda menor (2%). Isto devido a que os julgamentos dos decisores são agregados para obter uma medida geral e este novo valor é mais centralmente colocado, diminuindo assim as diferenças entre os valores.

Assim, pode ser concluído que os decisores entrevistados dão maior preferência para aquelas soluções de baixo custo, no entanto critérios de desempenho operacional (como a velocidade e confiabilidade em trânsito e coleta confiável), segurança do serviço (como o histórico de desempenho, resposta rápida, a cobertura e acesso), de atendimento ao cliente (como a cooperação e comunicação) entre outros, tem também alto grau de influência na decisão final. Por conseguinte, a decisão de escolha entre os modos de transporte de carga não é motivada unicamente em relevância aos custos relevantes. A Figura 6.24 apresenta a árvore de decisão com os pesos incorporados.

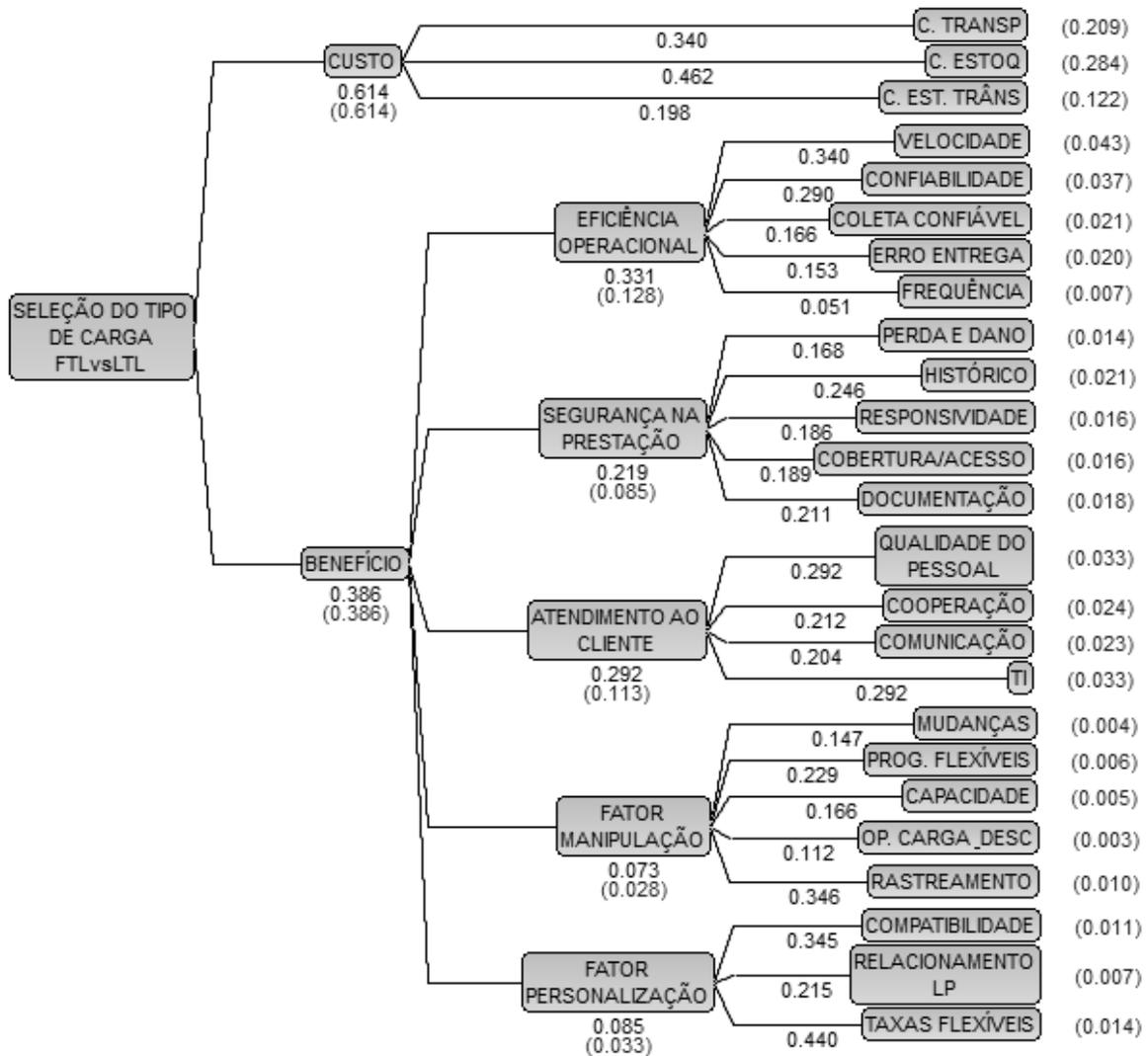


Figura 6.23 - Árvore de decisão para o caso e ponderação dos critérios

Após a construção da árvore de decisão, a incorporação dos pesos e respectivas funções de utilidade dos critérios, ele pode ser utilizado para avaliação das alternativas. Entende-se que o modelo decisório não gera alternativas, estas tem que ser fornecidas externamente pelos decisores ou analistas. Nesta metodologia, utiliza-se um modelo

matemático multiobjetivo para a geração das soluções. Estas soluções quando inseridas no modelo de decisão multicritério representa a base da metodologia proposta nesta pesquisa.

6.5 Implementação: determinação das alternativas

Para a geração de alternativas, considera-se a minimização dos custos de transporte (6.1), a minimização dos custos de manutenção de estoque (6.2) e a minimização dos custos de estoque em trânsito (6.3) como funções objetivos de modelos matemáticos independentes.

$$\text{Min F1} = \sum_{i \in CD} \sum_{j \in CL} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} c_{ijk} X_{ijkt} + \sum_{i \in CD} \sum_{j \in CL} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} a_{ijs} Y_{ijst} \quad (6.1)$$

$$\text{Min F2} = \sum_{j \in CL} \sum_{t \in T} h_j \overline{SS}_j + \sum_{j \in CL} \sum_{t \in T} h_j [(I_{jt-1} + Q_{jt} - I_{jt})/2 + I_{jt}] \quad (6.2)$$

$$\text{Min F3} = \sum_{i \in CL} \sum_{j \in CL} \sum_{t \in T} e_j \left(LTF TL_{ijk} \sum_{k \in K} (X_{ijkt} B_k) + LTL TL_{ij} \sum_{s \in S} Y_{ijst} \right) \quad (6.3)$$

Esta divisão permite a formulação de três modelos matemáticos, como citados a continuação:

- **Modelo A: Minimiza os custos de transporte.** Consiste na função objetivo (6.1) sujeito as restrições (4.3)-(4.15). Este modelo minimiza os custos de transporte dos carregamentos FTL e LTL, e não considera custos de manutenção de estoque nem custos de estoque em trânsito.
- **Modelo B: Minimiza os custos de manutenção de estoque.** Consiste na função objetivo (6.2) sujeito as restrições (4.3)-(4.15). Este modelo minimiza os custos de manutenção de estoque regular e de segurança, e não considera os custos de transporte nem de estoque em trânsito.
- **Modelo C: Minimiza custos de lead time de entrega.** Consiste na função objetivo (6.3) sujeito as restrições (4.3)-(4.15). Este modelo minimiza os custos de estoque em trânsito ou de forma similar, os custos do *lead time* da rede. Uma função objetivo similar foi proposta por Eskigun et al. (2005). Os autores justificaram que a redução do *lead time* reflete em benefícios para gestão da cadeia de suprimento, tais como a melhoria na capacidade de resposta às mudanças do mercado, a redução dos estoques em trânsito e a melhora da satisfação do cliente.

Seguidamente foi também utilizada uma função objetivo integrada para geração de múltiplas soluções (Equação 6.4).

$$F4 = \frac{\omega_1(F1 - F1^*)}{F1^*} + \frac{\omega_2(F2 - F2^*)}{F2^*} + \frac{\omega_3(F3 - F3^*)}{F3^*} \quad (6.4)$$

Sendo $F1^*$, $F2^*$ e $F3^*$ os valores ótimos ou também chamados “valores meta” das funções objetivo $F1$, $F2$ e $F3$ respectivamente. Os valores ω_1 , ω_2 e ω_3 representam os pesos relativos das funções objetivos. Assim, a equação (5.4) minimiza a soma ponderada dos desvios percentuais dos objetivos propostos. Cabe ressaltar que esta equação pode ser aplicada, mesmo nos casos onde as funções objetivo independentes apresentem unidades diferentes. Isto é possível porque a função objetivo minimiza os desvios percentuais em relação ao ótimo, ao invés de minimizar as diferenças dos valores em relação ao ótimo.

Esta modelagem multiobjetivo é classificada dentro dos métodos de otimização de soma ponderada (*Weighted Sum Method*). Os métodos de soma ponderada se caracterizam pela atribuição de pesos para todos os objetivos e pela combinação linear das funções objetivo em uma única função (MACIEL, 2012). Embora nesta dissertação este tipo de modelagem multiobjetivo foi utilizado, na verdade, qualquer método de otimização multiobjetivo para a geração de um conjunto de soluções pode ser bem aplicado. A finalidade desta etapa é precisamente a geração de um conjunto de alternativas visando talvez uma boa abrangência do espaço de soluções. Oliveira e Saramago (2010) apresentam algumas outras técnicas de otimização multiobjetivo que podem ser também aplicadas.

A Tabela 6.9 apresenta os valores das funções objetivo quando os valores ótimos são alcançados. Observa-se, por exemplo, que quando $F1$ é minimizado, os valores das funções objetivo são: $F1^* = R\$1.665.254$, $F2 = R\$9.521.164$ e $F3 = R\$1.087.989$. A solução ideal representa a solução onde todos os objetivos são levados a seu valor ótimo. Embora esta solução seja uma idealização, é necessária para o cálculo dos desvios percentuais.

Tabela 6.9 - Valores metas das funções objetivo

Minimizando	Valor em \$R de			Solução ideal
	$F1$	$F2$	$F3$	
$F1$	1.665.254	9.521.164	1.087.989	$F1^* = 1.6445.254$
$F2$	11.953.528	1.410.890	1.193.147	$F2^* = 1.410.890$
$F3$	9.152.929	7.187.336	733.520	$F3^* = 733.520$

Algumas combinações para os parâmetros ω foram definidas (Tabela 6.10). Estas combinações permitem gerar um conjunto de soluções não dominadas. Portanto, para toda solução não existe outra solução admissível que melhore simultaneamente todos os objetivos. Isto é, a melhoria em um objetivo é alcançada à custa de piorar, pelo menos, um dos outros.

Na Tabela 6.10 verifica-se que não existe um par de soluções tal que uma das soluções seja melhor em todos os objetivos. Os pesos ω das soluções (1)-(7) foram gerados ao explorar algumas combinações entre os três objetivos dando prioridade de 0 ou 1. A solução (4) representa a melhor solução encontrada pelo modelo matemático, discutida na seção 4.3.1.

Tabela 6.10 - Soluções não dominadas geradas em função dos pesos ω

SOL.	DESC	ω_1	ω_2	ω_3	Custo de transp. (R\$)	Custo manutenção de estoque (R\$)	Custo estoque trânsito (R\$)
1	TRANSP*	1	0	0	1.665.254	9.521.164	1.087.989
2	ESTOQ*	0	1	0	11.953.528	1.410.890	1.193.147
3	LEADT*	0	0	1	9.152.929	7.187.336	733.520
4	CUSTO*	1	1	1	2.084.293	1.510.606	1.296.306
5	TR+EST	1	1	0	2.061.157	1.445.917	1.499.711
6	TR+LT	1	0	1	1.815.846	19.067.884	1.000.879
7	EST+LT	0	1	1	12.570.194	1.335.917	743.907
8	PRF DM	0,34	0,46	0,20	2.106.467	1.493.885	1.147.162
9	ATUAL	N/A	N/A	N/A	2.202.895	1.891.418	1.280.695
10	FRAC	1	1	1	2.077.537	1.458.097	1.453.915
11	30/70	1	1	1	2.134.802	1.656.796	1.192.783
12	50/50	1	1	1	2.317.334	2.806.432	1.044.033
13	70/30	1	1	1	2.972.354	2.689.284	1.035.552
14	DEDIC	1	1	1	5.315.711	3.036.451	834.670

Os pesos da solução (8) representam os julgamentos combinados dos entrevistados com a técnica AHP-AIJ. A solução (9) é uma aproximação aos custos atuais da empresa e sua distribuição de carga atual, sendo 80% da demanda satisfeita como o modo de transporte de carga fracionada. É fundamental avaliar a solução atual do problema no modelo de análise de decisão, mesmo como uma aproximação à solução real.

As soluções (10)-(14) foram obtidas com restrições adicionais no modelo para alcançar os custos ótimos quando a distribuição da carga é definida a priori. Assim, a alternativa (10) apresenta a solução ótima em custo quando unicamente carga fracionada esta disponível, a alternativa (11) apresenta a solução ótima em custo para quando 30% da demanda for satisfeita com carga completa e a alternativa (12) refere à solução ótima quando 50% da demanda for satisfeita com carga completa.

As soluções (1), (2) e (3) foram obtidas ao minimizar F1, F2 e F3 respectivamente, enquanto as alternativas (4)-(8) foram obtidas ao minimizar F4 com os pesos definidos.

A Tabela 6.11 apresenta, em unidades de porcentagens da demanda total, como a carga é atribuída entre os modos de transporte de carga para as soluções analisadas. Para a solução (4), a qual dá a mesma prioridade para todos os custos, o 82,8% da demanda é satisfeita com LTL e o 17,2% restante com FTL.

Tabela 6.11 - Porcentagens de carregamentos FTL e LTL utilizado nas soluções analisadas

SOL.	DESC	Carga FTL	Carga LTL	Lead time médio da rede (dias)	Desvio padrão Lead time (dias)
10	FRAC	0,0%	100,0%	2,31	0,93
5	TR+EST	3,2%	96,8%	2,37	0,95
8	PRF DM	11,4%	88,6%	2,21	0,86
4	CUSTO*	17,2%	82,8%	2,19	0,85
9	ATUAL	20,0%	80,0%	2,16	0,84
11	30/70	30,0%	70,0%	1,99	0,76
1	TRANSP*	38,2%	61,8%	0,62	0,22
6	TR+LT	45,1%	54,9%	0,64	0,22
12	50/50	50,0%	50,0%	1,42	0,49
2	ESTOQ*	64,3%	35,7%	3,01	0,72
13	70/30	70,0%	30,0%	1,48	0,48
3	LEADT*	85,2%	14,8%	0,54	0,08
7	EST+LT	91,3%	8,7%	1,87	0,32
14	DEDIC	100,0%	0,0%	0,83	0,08

A Tabela 6.11 também apresenta o valor médio e o desvio padrão do *lead time* da rede para cada solução. Estes valores foram obtidos através da soma de todos os tempos de transporte em cada solução. Após, o somatório foi dividido sobre o número de clientes (70) e número de períodos (26) para obter uma medida de tempo em que a demanda periódica de cada cliente tarda em ser atendida. Para a solução (10), por exemplo, a demanda semanal de um cliente demora em média 2,31 dias em ser atendida com um desvio padrão de 0,93 dias.

A primeira instância estas estimações podem subestimar o tempo real de atendimento médio, devido a que nem todos os clientes são atendidos obrigatoriamente em todas as semanas. Porém, estes valores são uma medida interessante para comparar a velocidade geral da rede de distribuição e de sua variabilidade em cada solução. Os valores foram utilizados como atributos dos critérios "velocidade do transporte" e "confiabilidade do tempo em trânsito", para obter as utilidades usando as curvas (de utilidade) desenhadas para estes critérios.

As Tabelas 6.12 e 6.13 apresentam as valorações de utilidade das soluções analisadas para cada um dos critérios fundamentais. Para critérios quantitativos, estas valorações foram determinadas através das curvas de utilidade de cada critério e os valores dos atributos. Para

critérios de caráter qualitativo, estas valorações foram determinadas através das curvas de utilidade e a porcentagem de atribuição da demanda para cada modo de transporte de carga.

Considere a alternativa (4) que otimiza os custos associados. Nesta solução, 17,2% da demanda é satisfeita com carga completa. Os valores dos atributos para os critérios quantitativos foram:

- Custo de transporte: R\$ 2.084.293 → Utilidade $f(x)_{\text{CTRANSP}} = 97,1$
- Custo manutenção de estoque: R\$ 1.510.606 → $f(x)_{\text{CESTOQ}} = 100$
- Custo estoque trânsito: R\$ 1.296.306 → Utilidade $f(x)_{\text{CEST-TR}} = 55$
- Lead time médio da rede: 2,19 dias → Utilidade $f(x)_{\text{VELOCID}} = 62,3$
- Desvio padrão Lead time: 0,85 dias → Utilidade $f(x)_{\text{CONFIAB}} = 31,0$

Para o critério "velocidade do transporte", pode ser conferido que o valor de utilidade é obtido usando a função de utilidade do critério e o valor do atributo "lead time médio da rede". Como apresentado na seguinte equação:

$$f(X)_{\text{VELOCID}} = -12,103x^3 + 50,448x^2 - 84,739x + 133,04 \Rightarrow f(2,19)_{\text{VELOCID}} = 62,3$$

Para critérios de caráter qualitativo, a porcentagem de carga completa é usada como atributo e por meio das curvas definidas para cada critério o valor de utilidade é obtido. Considere, por exemplo, o critério "serviços de documentação e faturamento" e a distribuição da carga da alternativa (4), 17,2% com FTL e 82,8% com LTL. A Figura 6.25 apresenta o cálculo da utilidade para o critério através da função de utilidade, assim $f(x)_{\text{DOCUM}} = 54,3$.

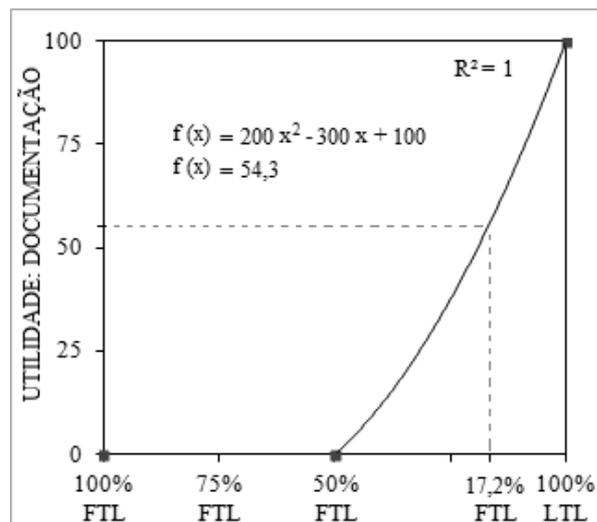


Figura 6.24 - Utilidade para o critério "documentação" da solução (4)

Após a determinação das alternativas e a valoração de cada uma com relação a cada critério, as soluções foram inseridas no modelo decisório construído nas seções 6.1-6.3.

Tabela 6.12 - Valores das alternativas em relação aos critérios relevantes- parte I

SOL	DESCR	CARGA FTL	BENEFÍCIO														
			CUSTOS RELEVANTES					EFICIÊNCIA OPERACIONAL					SEGURANÇA NA PRESTAÇÃO				
			CUSTO TRANSPORT	CUSTO ESTOQUE	CUST EST TRANSITO	VELOCID	CONFIAB	COLETA CONFIÁVEL	ERRO DE ENTREGA	FREQ. do SERVIÇO	SEGURANÇ DA CARGA	HIST DE DESEMP	RESPOSTA RÁPIDA	GOBERT E ACESSO	DOCUM		
1	TRANSP*	38,2%	98,7	-	83,5	97,1	87,9	45,5	41,8	78,6	71,4	44,1	16,8	61,8	14,6		
2	ESTOQ*	64,3%	-	100,0	78,3	4,4	55,1	59,2	61,7	72,4	77,6	57,1	36,7	35,7	-		
3	LEADT*	85,2%	16,3	-	100,0	100,0	100,0	80,0	82,6	72,4	77,6	67,6	57,6	14,8	-		
4	CUSTO*	17,2%	97,1	100,0	55,0	62,3	31,0	44,4	30,8	88,6	61,4	33,6	5,8	82,8	54,3		
5	TR+EST	3,2%	97,2	100,0	-	54,4	6,5	48,5	25,8	97,7	52,3	26,6	0,8	96,8	90,6		
6	TR+LT	45,1%	98,1	-	87,9	96,3	88,1	47,8	46,4	76,3	73,7	47,6	21,4	54,9	5,4		
7	EST+LT	91,3%	3,8	100,0	100,0	71,9	82,9	87,8	89,5	73,2	76,8	70,7	64,5	8,7	-		
8	PRF DM	11,4%	97,0	100,0	80,6	61,6	29,6	45,6	28,5	92,1	57,9	30,7	3,5	88,6	68,3		
9	ATUAL	20,0%	96,6	93,8	59,2	63,5	34,5	44,0	32,0	87,0	63,0	35,0	7,0	80,0	47,9		
10	FRAC	0,0%	97,1	100,0	23,5	57,1	12,4	50,0	25,0	100,0	50,0	25,0	-	100,0	100,0		
11	30/70	30,0%	96,9	98,4	78,3	68,7	49,8	44,0	37,0	82,0	68,0	40,0	12,0	70,0	28,0		
12	50/50	50,0%	96,1	-	85,7	79,7	75,0	50,0	50,0	75,0	75,0	50,0	25,0	50,0	-		
13	70/30	70,0%	93,5	-	86,1	78,9	75,7	64,0	67,0	72,0	78,0	60,0	42,0	30,0	-		
14	DEDIC	100,0%	84,1	-	96,2	90,6	99,8	100,0	100,0	75,0	75,0	75,0	75,0	-	-		

Os valores nas células são representados em unidades de utilidade, sendo valores entre 0 (sem preferência) e 100 (muita preferência).

Tabela 6.13 - Valores das alternativas em relação aos critérios relevantes- parte II

SOL	DESCR	CARGA FTL	BENEFÍCIO															
			ATENDIMENTO AO CLIENTE							FATOR MANIPULAÇÃO							FATOR PERSONALIZAÇÃO	
			QUALIDADE PESSOAL	COOPER	COMUNIC	TI	MUDANÇ	PROGR FLEXIVEIS	CAPACID	OPER CARGA/D	RASTR	COMPAT	RELAC P	TAXAS FLEXIVEIS				
1	TRANSP*	38,2%	75,0	85,4	42,7	30,9	27,3	38,2	57,3	45,5	50,0	1,0%	1,1%	0,7%	1,4%			
2	ESTOQ*	64,3%	75,0	58,7	55,1	17,9	20,4	64,3	44,9	59,2	50,0	50,0	27,6	59,7	59,7			
3	LEADT*	85,2%	75,0	27,3	55,2	7,4	10,0	85,2	44,8	80,0	50,0	50,0	27,6	70,2	70,2			
4	CUSTO*	17,2%	75,0	97,0	22,8	41,4	27,8	17,2	77,2	44,4	50,0	11,4	20,0	20,0	20,0			
5	TR+EST	3,2%	75,0	99,9	4,7	48,4	25,7	3,2	95,3	48,5	50,0	2,3	3,9	3,9	3,9			
6	TR+LT	45,1%	75,0	79,7	47,3	27,5	26,1	45,1	52,7	47,8	50,0	23,7	46,2	46,2	46,2			
7	EST+LT	91,3%	75,0	16,6	53,6	4,3	6,1	91,3	46,4	87,8	50,0	26,8	72,5	72,5	72,5			
8	PRF DM	11,4%	75,0	98,7	15,9	44,3	27,2	11,4	84,1	45,6	50,0	7,9	13,6	13,6	13,6			
9	ATUAL	20,0%	75,0	96,0	26,0	40,0	28,0	20,0	74,0	44,0	50,0	13,0	23,0	23,0	23,0			
10	FRAC	0,0%	75,0	100,0	-	50,0	25,0	-	100,0	50,0	50,0	-	-	-	-			
11	30/70	30,0%	75,0	91,0	36,0	35,0	28,0	30,0	64,0	44,0	50,0	18,0	33,0	33,0	33,0			
12	50/50	50,0%	75,0	75,0	50,0	25,0	25,0	50,0	50,0	50,0	50,0	25,0	50,0	50,0	50,0			
13	70/30	70,0%	75,0	51,0	56,0	15,0	18,0	70,0	44,0	64,0	50,0	28,0	63,0	63,0	63,0			
14	DEDIC	100,0%	75,0	-	50,0	-	-	100,0	50,0	100,0	50,0	25,0	75,0	75,0	75,0			

Os valores nas células são representados em unidades de utilidade, sendo valores entre 0 (sem preferência) e 100 (muita preferência).

6.6 Implementação: avaliação de alternativas

A Figura 6.26 representa as avaliações de utilidade geral para as alternativas consideradas. Esta avaliação está fundamentada na função de utilidade multiatributo global (Equação 5.1). Os resultados são fornecidos em uma escala de 0% a 100%, indicando a porcentagem em que a alternativa se desempenha com relação a todos os critérios.

Devido à dificuldade de analisar todas as soluções levando em conta todos os critérios e ainda considerando as funções de utilidade, uma ferramenta computacional pode ser útil. O software V.I.S.A.® (*Visual Interactive Sensitivity Analysis for Multi-Criteria Decision Making*) permite integrar todas as etapas anteriores através de uma interface amigável que facilita a comunicação entre o tomador de decisões e o analista. Deste modo, a ferramenta foi utilizada para agregar as utilidades em um valor global.

Os resultados indicaram como a alternativa mais preferida a solução que atribui 30% da demanda para carga completa, atingindo 77,1% do objetivo geral. Entende-se que esta solução é a mais adequada para o objetivo de maximizar o desempenho do sistema de distribuição com relação às prioridades e aversão ao risco dos tomadores de decisões.

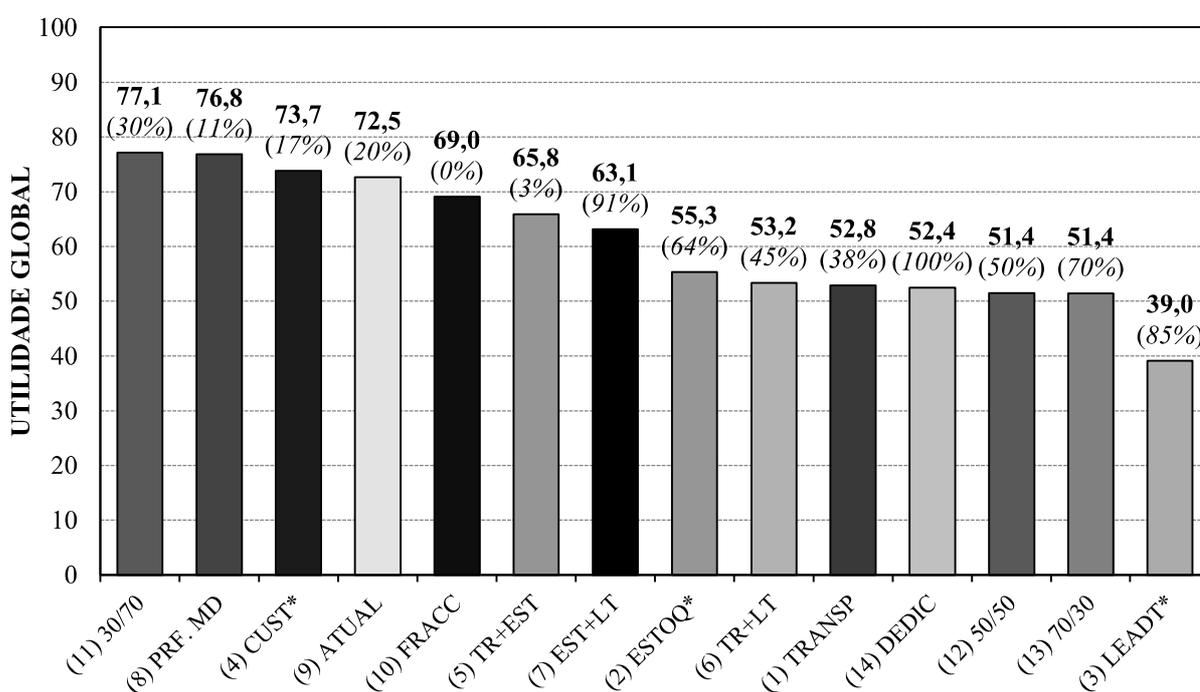


Figura 6.25 - Avaliação geral das alternativas

A Figura 6.25 também apresenta como segunda alternativa mais preferida à solução gerada pelos julgamentos combinados dos decisores (8), seguida pela solução que otimiza os custos de forma conjunta (4) e pela solução atual aproximada da empresa (9). Entre os parêntesis apresenta-se a porcentagem da demanda atendida com carga completa para cada

alternativa. Observa-se que as soluções mais preferidas supõem baixas porcentagens de carga completa. A solução menos preferida é a que otimiza os custos de estoque em trânsito ou *leadtime*, com uma porcentagem de carga completa de 85% e uma utilidade global de 39,0%.

A Tabela 6.14 apresenta as utilidades para os critérios gerais "custo" e "benéfico". Observa-se que enquanto a alternativa PRF-DM (gerada pelos julgamentos combinados dos decisores) apresenta o melhor desempenho para o "custo", a alternativa LEADT* (que atribui 85% da demanda para carga completa) tem a maior utilidade para o "benefício". No entanto, a maior utilidade global é fornecida pela solução 30/70.

O resultado anterior deixa claro que os decisores julgaram mais positivamente àquelas soluções com baixo custo, no entanto as soluções que otimizaram custos tenderam a subestimaram alguns critérios de benefício. Por outro lado, alternativas como LEADT* implicaram soluções baseadas na rápida resposta e os benefícios derivados, no entanto os seus custos foram muito elevados. Uma compensação aceitável foi alcançada pela solução 30/70 que, embora não proveu o melhor desempenho em custo ou benefício, apresentou um desempenho apropriado em ambos os critérios gerais.

Na Tabela 6.14 também pode ser observadas as soluções com piores desempenhos para custo (LEADT*) e benefício (TR+EST que dedica 3% da demanda).

Tabela 6.14 - Utilidade para custo e benefício das alternativas

SOL.	DESCR.	CARGA FTL	UTILIDADE		
			CUSTO	BENEFÍCIO	GERAL
1	TRANSP*	38.2%	30.7	22.1	52.8
2	ESTOQ*	64.3%	37.9	17.3	55.3
3	LEADT*	85.2%	15.6	23.4	39.0
4	CUSTO*	17.2%	55.3	18.4	73.7
5	TR+EST	3.2%	48.6	17.2	65.8
6	TR+LT	45.1%	31.1	22.1	53.2
7	EST+LT	91.3%	41.4	21.7	63.1
8	PRF DM	11.4%	58.4	18.4	76.8
9	ATUAL	20.0%	53.9	18.6	72.5
10	FRAC	0.0%	51.5	17.6	69.0
11	30/70	30.0%	57.7	19.4	77.1
12	50/50	50.0%	30.5	21.0	51.4
13	70/30	70.0%	30.0	21.4	51.4
14	DEDIC	100.0%	29.2	23.2	52.4

Os resultados da Tabela 6.14, no geral, mostraram que alternativas com altas porcentagens de carga fracionada implicaram boas utilidades em custo, enquanto alternativas com altas porcentagens de carga completa refletiram em boas utilidades para o benefício.

A solução atual da empresa (9) apresentou uma utilidade global de 72,5%, sendo 20% da demanda atendida com carga completa. Entretanto, a solução gerada pelos julgamentos agrupados dos decisores (8) apresentou uma utilidade global de 76,8% e sugere um atendimento com 11,4% de carga completa. Nota-se que embora a solução atual da empresa esteja mais próxima de atingir o 30% de carga completa, assim como a solução mais preferida sugere, a solução (8) teve maior utilidade. Isto indica que a utilidade global não é uma função linear do modo de transporte de carga e, portanto, não pode ser concluído que uma maior ou menor porcentagem de carga dedicada melhora ou empiora o desempenho do sistema.

A Figura 6.27 também apresenta o comportamento das soluções em relação ao custo e benefício, bem como uma aproximação à fronteira eficiente de Pareto. Isto é uma aproximação porque nem todas as soluções que fazem parte da fronteira foram encontradas. Esta figura pode ajudar ao analista a excluir alternativas de pouca relevância para análises posteriores.

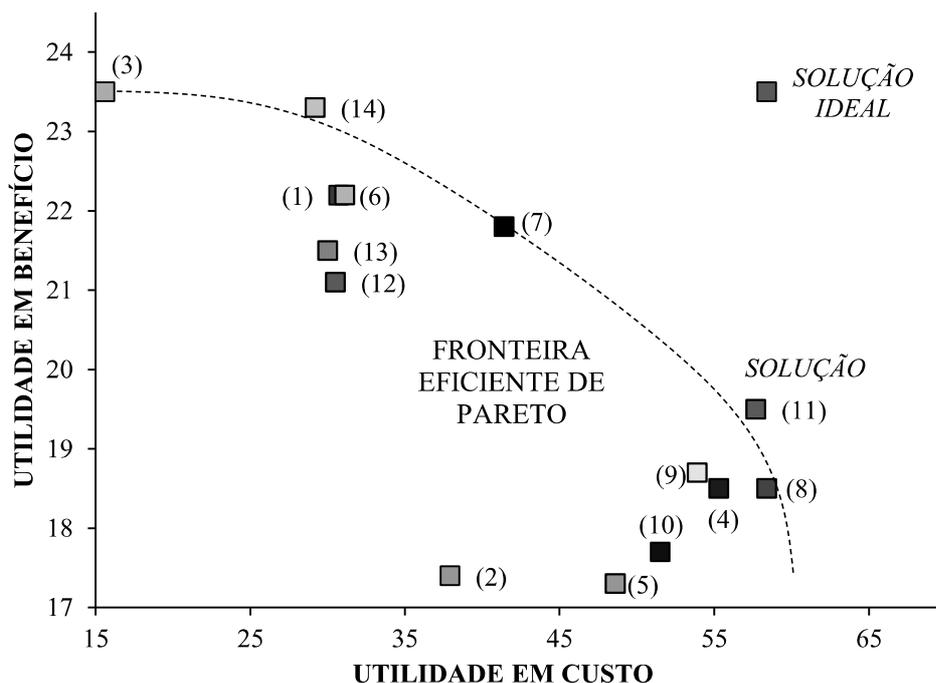


Figura 6.26 - Aproximação à fronteira eficiente de Pareto para Custo e Benefício

Na Figura 6.27 observa-se também que o conjunto de soluções $\{(1), (13), (12), (9), (4), (10), (2), \text{ e } (5)\}$ é dominado pelo conjunto $\{(3), (14), (6), (7), (11) \text{ e } (8)\}$. Este segundo conjunto representa as soluções não dominadas ou eficientes que fazem parte da fronteira ótima de Pareto. Tomando como base os resultados anteriores, análises de sensibilidade serão feitas considerando a alternativa (11), com maior utilidade global, como a solução provisória. O conjunto de soluções dominadas não será considerado.

6.7 Implementação: análises de sensibilidade

Esta etapa consiste em realizar variações nas preferências ou funções de utilidade dos critérios para analisar o desempenho da solução provisória. Caso a solução provisória continue sendo sugerida pelo modelo decisório, disse-se que a solução é robusta ou que tem alto grau de aderência. Consideram-se as seguintes análises de sensibilidade:

- Variação na ponderação dos critérios.
- Método *Rank Centroid* (ROC) para ponderação dos critérios.
- Estratégia de agrupamento com julgamentos ponderados.
- Decisores com neutralidade ao risco.

6.7.1 Variação na ponderação dos critérios.

A Figura 6.28 apresenta o comportamento das soluções frente a mudanças na preferência do critério de primeiro nível "benefício". Observa-se que quando o peso do benefício varia entre 0% e 16%, a solução sugerida é a (8). Quando o peso do benefício varia entre o 16% e 82% a metodologia sugere a escolha da alternativa (11), e unicamente para pesos maiores a 96% a alternativa (3) torna-se a mais preferida. Portanto, a alternativa provisória (11) apresenta um amplo intervalo de preferência para a qual ela se mantém como a alternativa mais preferida.

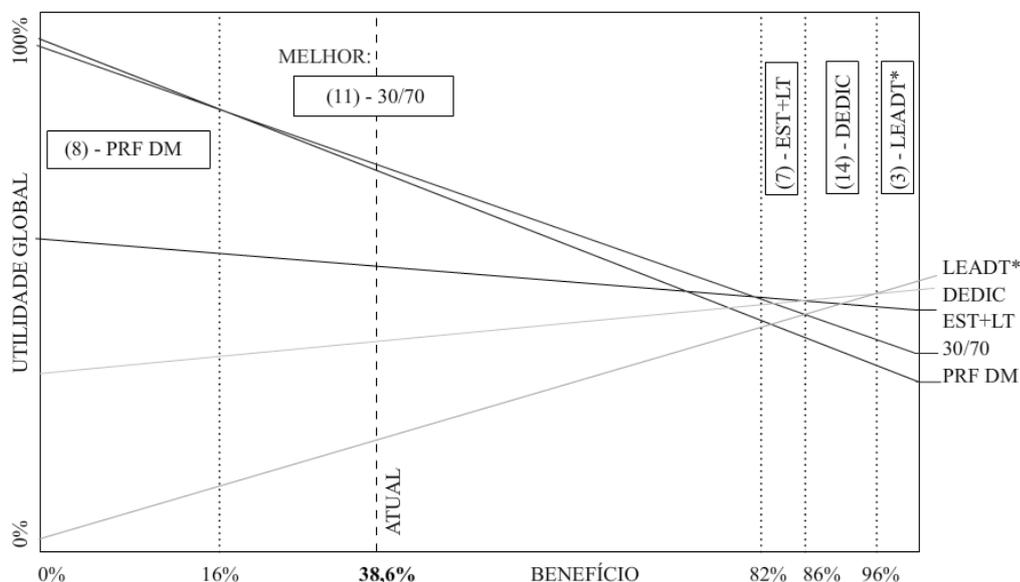


Figura 6.27 - Análises de sensibilidade: Variação da preferência do Benefício

Para todos os critérios restantes -de primeiro, segundo e terceiro nível- a solução provisória continuou apresentando um bom desempenho. Foram necessárias grandes mudanças nas preferências dos critérios para tornar outra solução mais preferida, e mesmo nestes casos, a alternativa (11) se mantendo entre as primeiras.

6.7.2 Técnica *Rank Order Centroid (ROC)* para ponderação dos critérios.

Esta técnica foi desenvolvida por Edwards e Barron (1994). Os pesos são obtidos diretamente a partir da ordem de importância dos critérios. Esta técnica é mais simples que a técnica AHP utilizada, pois elimina o processo de múltiplas comparações entre os critérios que pode resultar cansativo e demorado para os decisores. Os pesos pré-definidos são chamados de *Rank Order Centroid (ROC)*. A forma de calcular os pesos foi apresentada na seção 4.3.2.

A Tabela 6.15 apresenta os pesos ROC para todos os critérios, baseados na ordem de importância definida pelos julgamentos combinados.

Tabela 6.15 - Comparação entre diferentes métodos de ponderação de critérios

Critérios	AHP-AIJ		Pesos ROC		AIJ-Ponderado	
	Pesos R.	Pesos R.	Pesos R.	Pesos F.	Pesos R.	Pesos F.
Custos relevantes	61,4%	61,4%	75,0%	75,0%	63.50%	63.50%
C. Transporte	34,0%	20,8%	27,70%	20,78%	34.20%	21.70%
C. Estoque	46,2%	28,4%	61,10%	45,83%	41.10%	26.10%
C. Est. Trânsito	19,8%	12,2%	11,20%	8,40%	24.70%	15.70%
Benefício	38,6%	38,6%	25,0%	25,0%	36.50%	36.50%
<i>Eficiência Operacional</i>	<i>33,0%</i>	<i>12,8%</i>	<i>45,60%</i>	<i>11,40%</i>	<i>30.60%</i>	<i>11.20%</i>
Velocidade	34,0%	4,3%	45,60%	5,20%	29.60%	3.30%
Confiabilidade	29,0%	3,7%	25,70%	2,93%	26.80%	3.00%
Coleta confiável	16,6%	2,1%	15,70%	1,79%	18.20%	2.00%
Erro de entrega	15,3%	2,0%	9,00%	1,03%	17.40%	2.00%
Frequência	5,1%	0,7%	4,00%	0,46%	8.00%	0.90%
<i>Segurança na prestação</i>	<i>21,9%</i>	<i>8,5%</i>	<i>15,70%</i>	<i>3,90%</i>	<i>26.20%</i>	<i>9.60%</i>
Segurança da carga	16,8%	1,4%	4,00%	0,16%	23.20%	2.30%
Histórico	24,6%	2,1%	45,60%	1,78%	21.30%	2.00%
Responsividade	18,6%	1,6%	9,00%	0,35%	18.10%	1.70%
Cobertura/ acesso	18,9%	1,6%	15,70%	0,61%	18.90%	1.80%
Documentação	21,1%	1,8%	25,70%	1,00%	18.50%	1.80%
<i>Atendimento ao cliente</i>	<i>29,2%</i>	<i>11,3%</i>	<i>25,70%</i>	<i>6,40%</i>	<i>24.20%</i>	<i>8.80%</i>
Qualidade pessoal	29,2%	3,3%	52,00%	3,33%	31.50%	2.70%
Cooperação	21,2%	2,4%	14,60%	0,93%	22.60%	2.00%
Comunicação	20,4%	2,3%	6,30%	0,40%	24.60%	2.20%
T.I.	29,1%	3,3%	27,10%	1,73%	21.30%	1.90%
<i>Fator manipulação</i>	<i>7,3%</i>	<i>2,8%</i>	<i>4,00%</i>	<i>1,00%</i>	<i>9.30%</i>	<i>3.40%</i>
Mudanças	14,7%	0,4%	9,00%	0,09%	18.70%	0.60%
Prog. Flexíveis	22,9%	0,6%	25,70%	0,26%	24.10%	0.80%
Capacidade	16,6%	0,5%	15,70%	0,16%	18.70%	0.60%
Op. carga/descarga	11,2%	0,3%	4,00%	0,04%	12.60%	0.50%
Rastreamento	34,7%	1,0%	45,60%	0,46%	25.90%	0.90%
<i>Fator personalização</i>	<i>8,5%</i>	<i>3,3%</i>	<i>9,00%</i>	<i>2,30%</i>	<i>9.60%</i>	<i>3.50%</i>
Compatibilidade	34,5%	1,1%	27,70%	0,64%	42.70%	1.50%
Relacionamento LP	21,5%	0,7%	11,20%	0,26%	21.80%	0.80%
Taxas flexíveis	44,0%	1,4%	61,10%	1,41%	35.50%	1.20%

A motivação pela implementação desta técnica foi verificar se métodos mais simples para ponderação de critérios fornecem a mesma ordem de preferência entre as alternativas, de forma a minimizar o tempo utilizado para este processo.

A Tabela 6.16 apresenta o desempenho das alternativas em função dos pesos ROC. Observa-se que as soluções (11) e (8) são agora igualmente preferidas. Isto indica uma boa aderência da solução provisória frente a mudanças na técnica de ponderação utilizada. Como outro resultado, os pesos ROC forneceram uma classificação de alternativas similar à obtida com AHP. Em base a isto, a técnica *ROC* representa uma alternativa válida para obtenção de ponderações quando o tempo disponível para realização deste processo é relativamente curto, em comparação com AHP.

Algumas outras técnicas de ponderação poderiam ser também utilizadas, porém não foi foco desta dissertação a avaliação aprofundada destas mudanças.

Tabela 6.16 - Resumo das análises de sensibilidade

SOL	DESCR	Carga FTL	Normal		Usando ROC		DM3 Priorizado		Neutralidade	
			Utilidade	Ranking	Utilidade	Ranking	Utilidade	Ranking	Utilidade	Ranking
1	TRANSP*	38,2%	52,8	10	43,5	9	54,9	10	41,5	13
2	ESTOQ*	64,3%	55,3	8	63,0	7	55,5	9	63,1	8
3	LEADT*	85,2%	39,0	13	29,1	13	41,4	13	28,4	14
4	CUSTO*	17,2%	73,7	3	83,1	2	73,0	3	82,1	2
5	TR+EST	3,2%	65,8	6	77,5	5	63,3	7	80,4	5
6	TR+LT	45,1%	53,2	9	43,8	8	55,6	8	41,8	12
7	EST+LT	91,3%	63,1	7	70,5	6	63,5	6	65,7	7
8	PRF DM	11,4%	76,8	2	85,2	1	76,9	2	83,4	1
9	ATUAL	20,0%	72,5	4	80,6	3	72,1	4	74,9	6
10	FRAC	0,0%	69,0	5	79,8	4	67,2	5	80,9	4
11	30/70	30,0%	77,1	1	85,2	1	77,2	1	81,3	3
12	50/50	50,0%	51,4	12	42,0	11	54,0	12	56,7	10
13	70/30	70,0%	51,4	12	41,9	12	54,2	11	57,9	9
14	DEDIC	100,0%	52,4	11	42,8	10	55,6	8	47,5	11

6.7.3 Estratégia de agrupamento com julgamentos ponderados.

Em alguns casos, decisores com maior responsabilidade, experiência ou com cargos de maior nível hierárquico podem ser priorizados dando pesos maiores para os seus julgamentos. Para esta análise, consideram-se os julgamentos do decisor mais experiente (DM3) de maior prioridade e utiliza-se a técnica de agrupamentos por julgamentos individuais ponderados (*Aggregation of weighting Individual Judgement*) do AHP para obter os pesos gerais, como

apresentado por Barbosa e Vieira (2014). Desta forma, as prioridades dos decisores DM1, DM2 e DM3 foram 20%, 20% e 60% respectivamente.

A Tabela 6.16 também apresenta o desempenho das alternativas para este análise de sensibilidade. Observa-se que a solução provisória (11) se mantém ainda como a mais preferida, no entanto a solução (8) gerada pelos julgamentos combinados dos decisores também apresenta um bom desempenho. Observa-se também para as quatro soluções mais preferidas {(11), (8), (4), (9)}, que a porcentagem de carga completa varia entre 10%-30%. Isto reflete a preferência dos decisores pela utilização de carga fracionada (LTL).

Da análise anterior pode ser concluir também que ao priorizar os julgamentos de cada decisor obtém-se como resultado uma tendência a satisfazer os seus objetivos particulares. Anteriormente foi mencionado que o DM3 valorou as soluções de baixo custo e alto desempenho em segurança na prestação de serviço. Foi observado, portanto, um aumento na utilidade geral nas alternativas (3), (7), (13) e (14), as quais utilizaram mais de 70% de carga completa para tender a demanda dos clientes, contribuindo para maior segurança do serviço.

6.7.4 Decisores com neutralidade ao risco

Como observado anteriormente, os respondentes nesta dissertação apresentaram atitudes de aversão ao risco. Deste modo, é possível que os decisores tenham superestimado o desempenho das melhores alternativas ao fornecer altos valores de utilidade. Para tais casos, evita-se em maior medida a possibilidade de escolher uma solução com baixo desempenho. No caso contrario, decisores poderiam ser propensos ao risco, permitindo-se subestimar o desempenho das melhores alternativas com intenção de não desconsiderar soluções com péssimo desempenho em algum critério particular.

Por fim, os tomadores de decisões podem apresentar atitudes de neutralidade ao risco. Nestes casos espera-se atribuir valores de utilidade às alternativas sem superestimar ou subestimar os desempenhos reais. As curvas de utilidade quando desenhadas em neutralidade ao risco são funções lineais. O método SMARTS (SMART usando *Swing Weighting*) foi desenvolvido por Edwards e Barron (1994) e uma das diferenças fundamentais com SMART é precisamente a utilização de aproximação linear para desenhar as funções de utilidade.

A Tabela 6.16 apresenta o desempenho das alternativas para esta análise de sensibilidade. Observa-se agora que as soluções (8) e (4) são mais preferidas que a solução provisória. Isto indica que o fato dos decisores preferir a solução provisória (11), pode ser uma ação motivada pela aversão ao risco destes tomadores de decisões. Para decisores com

outros comportamentos com relação a risco pode ser esperar soluções ainda diferentes, de aqui a necessidade de selecionar cuidadosamente os decisores e respondentes.

Vale ressaltar que embora a característica de neutralidade permita sugerir soluções que a primeira instância pareçam mais lógicas, pois não subestima nem superestima o desempenho, deve se respeitar a conduta de risco real do decisor. Na verdade, nenhuma atitude ao risco é particularmente mais preferida que a atitude real. No entanto, para os casos onde existem muitos critérios ou alternativas, pode resultar tedioso e demorado levantar as curvas de utilidade. Deste modo, uma aproximação linear através de dois pontos extremos pode poupar ao analista e ao decisor um tempo considerável.

6.8 Recomendação de curso de ação

Após as análises de sensibilidade, a alternativa provisória pode se tornar a solução final escolhida. Baseado nos resultados é possível concluir que grandes variações nas ponderações dos critérios são necessárias para gerar uma mudança na solução sugerida, o que evidencia a robustez da abordagem proposta. Adicionalmente, para outras técnicas utilizadas a solução provisória também apresentou um bom comportamento.

Portanto, recomenda-se ao decisor escolher a alternativa (11), sendo esta caracterizada por satisfazer 30% da demanda através de carga completa e 70% com carga fracionada. Esta solução apresenta um custo total de R\$4.984.380,6 anuais, um nível de estoque de segurança médio por cliente de 1,6 m³ e uma média de dois (2) dias para satisfazer a demanda semanal dos clientes (ou CD regionais). A solução também implica transportar 78% da carga completa em veículos com capacidades de 36m³. A solução tem uma diferença de custos de R\$93.177 anuais com respeito à melhor solução de custo encontrada (alternativa 4).

Esta solução embora não seja ótima em custo, provê melhores condições de entrega, é menos propensa a equivocções e a variabilidade e, portanto menos propensa a custos não visíveis diretamente nas planilhas de custo. A solução ótima em custo parece ser uma tendência à redistribuição da mercadoria e uma menor percepção do serviço por parte do cliente.

Vale ressaltar que a escolha final sempre compete aos tomadores de decisões, os quais podem aceitar ou rejeitar a sugestão do analista. Porém espera-se provocar, como mínimo, um maior entendimento do problema e um maior domínio da metodologia e técnicas utilizadas.

7. CONCLUSÕES

7.1 Sobre o objetivo da pesquisa

Esta dissertação teve como objetivo propor uma metodologia para abordar o problema de planejamento da distribuição e estoque em um sistema onde os modos de transporte de carga completa (FTL) e fracionada (LTL) estavam disponíveis. Diferente de outras abordagens, este trabalho teve foco na integração da otimização e a consideração de fatores relevantes de difícil quantificação. A metodologia combinada, incorporando uma gama de critérios/fatores qualitativos e quantitativos, é a principal contribuição desta dissertação. A metodologia proposta foi validada por meio de um estudo de caso sobre a rede de distribuição de uma empresa no setor das telecomunicações, cujas operações são representativas do tipo de indústria.

A metodologia foi fundamentada nas funções de utilidade da teoria da utilidade, cujas propriedades permitem incorporar as preferências e atitude ao risco do decisor para avaliar o desempenho de alternativas. Um caso real foi abordado em uma empresa brasileira para testar a eficiência da abordagem em situações reais.

Para isso, inicialmente um conjunto de critérios relevantes para a escolha entre prestadores de serviço de transporte, em geral, foi levantado da literatura. Estes critérios, quando julgados pelos decisores, evidenciaram as diferenças entre os modos de transporte de carga considerados (FTL e LTL). Além dos custos relevantes, critérios como velocidade do transporte, confiabilidade do tempo em trânsito, reputação pelo serviço, capacidade de prestar serviços que não danifiquem bem em trânsito, taxas flexíveis e serviços de documentação e faturamento, foram repetidamente citados. Uma lacuna de pesquisa foi identificada acerca do levantamento de critérios para seleção específica entre modos de transporte de frota comum.

Para definir as preferências entre os critérios apontados, o método de ponderação AHP foi utilizado devido a sua aceitação e amplo uso na literatura e na prática. Técnicas de agrupamento de julgamentos foram também utilizadas para obter as ponderações agrupadas dos diferentes decisores. O AHP demonstrou ser útil para a construção da hierarquia, no entanto consome bastante tempo na obtenção das ponderações.

Um modelo matemático foi desenvolvido, baseado nas formulações para distribuição, com objetivo de gerar um conjunto de soluções a serem avaliadas. Algumas características foram agregadas ao modelo motivadas pela observação sobre a rede de distribuição real. Desta forma, estoques de segurança em função dos tempos de atendimento de cada modo de

transporte foram considerados. Outras características como uma frota heterogênea FTL e restrições de acesso por tipo de veículos, bem como estruturas de descontos LTL por quantidade transportada e nível de serviço foram também incluídas.

Estudos computacionais realizados sobre um exemplar de dados em particular permitiram verificar a adequação do modelo para representar as decisões envolvidas no problema. Como resultado, a modelagem proposta gerou planejamentos plausíveis para o sistema de distribuição em tempos de execução aceitáveis para as empresas. O *gap* médio entre todos os experimentos foi apenas de 1,08% e no caso em que o *gap* foi definido para ser alcançado em 5%; o tempo médio de execução foi apenas de 235,2 segundos. Isto permitiu concluir, pelo menos para a instância considerada, que a modelagem proposta alcança boas soluções (*gap* baixos) rapidamente. Para instâncias ainda maiores pode ser necessário explorar outros métodos de solução com objetivo de aprimorar os tempos de processamento.

Em relação ao caso abordado, os julgamentos agrupados evidenciaram a preferência dos decisores pelo custo em relação ao benefício. Segundo esta ponderação agregada, um baixo custo geral representou um bom desempenho do sistema em pelo menos 61,4% das vezes. De outra forma, o benefício explicou 38,6% do desempenho do sistema. Isto é um interessante aspecto que permite concluir que a escolha não é motivada unicamente pelo custo, ou por um critério particular, mas sim pela diversidade e combinação de todos estes fatores. Assim, a integração de técnicas gerou uma solução que poderiam não ser obtidas através da implementação das técnicas de forma independente.

A partir de uma versão multiobjetivo do modelo, várias soluções eficientes foram geradas, com objetivo de serem avaliadas pela estrutura decisória construída. Como resultado, a abordagem sugeriu a distribuição da carga da forma “30% FTL - 70% LTL” em comparação ao planejamento “20% FTL - 80% LTL” usado pela empresa. Isto sugere um incremento no uso da carga completa em função dos benefícios obtidos com este modo de transporte, dentro dos quais podem ser citados: menor tempo e variabilidade no transporte, confiabilidade na coleta e baixo erro na entrega, segurança da carga, maior possibilidade de negociar a tabela de fretes, melhor histórico de desempenho, maior controle e comunicação, resposta mais rápida, entre outros.

Pode-se verificar através de análises de sensibilidade que a aversão ao risco dos decisores condicionou significativamente a escolha final. Para o caso em que decisores apresentavam um comportamento de neutralidade ao risco, outra solução se tornou a mais preferida. Portanto a incorporação das funções de utilidade foi parte fundamental para propor

uma solução mais alinhada com as necessidades reais dos tomadores de decisões. Outras análises de sensibilidade permitiram conferir o bom desempenho da solução sugerida frente a vários cenários de interesse propostos.

7.2 Implicações teóricas e contribuição da pesquisa

Diferentemente das abordagens encontradas na literatura, a abordagem proposta considera um conjunto de fatores críticos relevantes para os tomadores de decisões e os utiliza para avaliar soluções geradas por um modelo matemático para o problema específico. Assim, espera-se que as soluções fornecidas sejam capazes de emular as preferências reais do tomador de decisões, as quais muitos outros modelos não levam em conta.

Abordagens de otimização multicritério são cada vez mais usadas, talvez porque os profissionais e acadêmicos estão reconhecendo a importância dos aspectos comportamentais da tomada de decisão (WALLENIOUS et al., 2008). Porém pouca pesquisa deste tipo foi encontrada na literatura. Deste modo, este trabalho contribui com a extensão da literatura sobre as ferramentas multi-metodológicas incluindo otimização, ainda menos disponíveis quando aplicadas a casos reais. Este trabalho foi motivado pelo artigo publicado de De la vega, Vieira e Toso (2014) em que os autores analisaram o problema de localização de CDs através de um modelo matemático para abertura de CD com múltiplas capacidades e incorporaram um conjunto de critérios qualitativos relevantes identificados na literatura.

Outra contribuição teórica refere-se ao modelo matemático proposto, o qual aportou características interessantes à literatura dos problemas integrados de distribuição e estoque. O modelo considerou uma rede de distribuição onde as características dos modos de transporte de carga foram aprofundadas para analisar os *trade-offs* existentes entre custo, tempo de resposta e nível de serviço desejado.

Os critérios levantados nesta dissertação são outra importante contribuição da pesquisa, pois colabora para a organização da literatura sobre os fatores que influenciam à tomada de decisão da escolha entre os modos de transporte de carga rodoviário.

7.3 Implicações gerenciais

Do ponto de vista prático e gerencial, os resultados obtidos neste trabalho podem apoiar a tomada de decisão sobre a distribuição de mercadoria usando os modos de transporte de carga FTL e LTL. Estes resultados foram particularmente interessantes para a empresa do caso, porém podem ser estendidos através do modelo proposto para empresas do setor e empresas de outros setores com redes logísticas similares.

A ferramenta desenvolvida permite aos decisores agregar suas preferências enquanto ainda considera a otimização dos custos do sistema. Os decisores podem também formular cenários de interesse e comparar o seus resultados. Portanto, existe um ganho de flexibilidade para análises de problemas.

Outra implicação gerencial refere-se às possíveis reduções de custo de distribuição em empresas interessadas na implementação da abordagem proposta, a qual é acompanhada pela otimização das políticas de transporte e estoque em conjunto.

7.4 Limitações da pesquisa

Algumas limitações para o desenvolvimento da pesquisa são listadas como segue:

Subjetividade dos critérios: Existe na literatura um conjunto de critérios bem distinguidos, porém observou-se a pouca operacionalização. Alguns autores se focaram em apresentar uma lista de critérios relevantes. No entanto, métricas, indicadores ou definições não foram apontados. Isto é uma limitação no sentido em que cada critério pode ser entendido de forma diferente para os casos abordados.

Análise de um único caso: Nesta dissertação um caso real foi utilizado para aplicação da metodologia. Embora um único caso não seja suficiente para validar a metodologia, foi observado um bom desempenho do processo em geral e a solução sugerida é suscetível de ser aplicada pela empresa.

7.5 Limitações e contribuições da abordagem proposta

Adicionalmente algumas limitações e contribuições da abordagem híbrida proposta também são apresentadas como segue:

Tipo de problema abordado: O tempo necessário para efetuar todas as etapas da metodologia assim como a necessidade de realizar uma avaliação mais analítica do que descritiva limita os problemas que podem ser tratados com esta abordagem. Desde esta perspectiva, problemas de nível estratégico e/ou tático seriam mais propícios para ser abordados. Por outro lado, os problemas operacionais requerem respostas rápidas para responder a um planejamento em curto prazo, portanto podem não ser adequados para serem abordados desta forma.

Métodos e ferramentas necessárias: A combinação de métodos pode demandar também a necessidade de usar diversas ferramentas computacionais. Estas ferramentas podem implicar um alto investimento para algumas empresas, no entanto não são imprescindíveis

quando o analista conhece os métodos. Nesta dissertação todas as etapas, a exceção da geração de alternativas, foram executadas também através de planilhas de cálculo em Excel.

Decisores: A abordagem requer de um forte envolvimento com os profissionais da empresa, pois os dados não são o único recurso necessário. O recurso mais fundamental é talvez a participação dos decisores chaves. Estes decisores devem estar diretamente relacionados com o problema, pois são eles quem priorizam os critérios que influenciam na escolha final. A limitação pode resultar no caso em que estes decisores chaves não estejam disponíveis para oferecer seus julgamentos.

As características do modelo matemático: Para um mesmo problema podem existir diferentes formulações válidas. Por isso a importância de realizar um bom delineamento do problema de forma a incluir as decisões mais importantes. Uma das principais contribuições da incorporação do modelo matemático na metodologia proposta é a agregação de objetividade a um processo decisório implicitamente subjetivo.

Solução sugerida: A solução sugerida pela metodologia pode não ser a solução ótima em custo visível. Por outro lado, espera-se que esta forneça o melhor desempenho geral. Além de custo baixo e aceitável, esta solução satisfaz outras necessidades em comparação às outras soluções. Isto é uma importante contribuição, especialmente nos casos onde muitos objetivos conflitantes aparecem. Vale ressaltar que a solução sugerida também tem a característica de manter um bom desempenho frente aos vários cenários propostos.

Subjetividade: A metodologia não elimina a subjetividade inerente aos decisores, porém a torna mais explícita. Desta forma os decisores são mais conscientes das suas escolhas.

Implementação: Muitas vezes, embora ótima, a solução pode ser inviável de ser implementada devido a aspectos de caráter qualitativo que não foram considerados nos modelos matemáticos. Ao levar em conta outros critérios externos à modelagem, esta metodologia é uma tentativa de fornecer soluções mais adequadas ao contexto prático. Esta característica é uma forte contribuição desta pesquisa.

7.6 Perspectivas para futuras pesquisas

As futuras pesquisas podem ser citadas com relação à metodologia e com relação ao problema de distribuição tratado. Um desdobramento da abordagem proposta refere-se à implementação sobre outros problemas com objetivo de verificar o seu desempenho. Desta forma, problemas logísticos como a seleção de fornecedores e localização de facilidades, assim como problemas de outras áreas poderiam ser abordados da forma proposta.

Conforme a sua importância, convém analisar também o impacto de outros métodos de ponderação de critérios, bem como estudar a influência das técnicas de agrupamento de ponderações, devido a que nos grandes e importantes problemas mais de um decisor costuma estar envolvido. (CHAN; CHUNG, 2005)

Com relação ao problema específico, esta pesquisa teve foco no problema monoestágio de distribuição desde os grandes CD até os CD regionais. A inclusão das decisões envolvidas no segundo estágio (CD regionais para clientes finais) também motiva o desenvolvimento de trabalhos futuros. As decisões de clusterização – associadas com problemas de cobertura, partição e empacotamento de conjuntos – tem grande impacto no sistema de distribuição real, pois afeta os custos de distribuição final e roteamento. Desta forma, formulações de múltiplos estágios considerando clusterização e roteamento, bem como as demais características do problema representam uma perspectiva para trabalhos futuros.

Com relação às políticas de inventário, na formulação proposta, níveis de estoque de segurança foram definidos para cada cliente em função da demanda e o tempo de atendimento esperado. Embora útil, está é uma representação determinística a um problema de grande caráter estocástico. Os estoques de segurança em redes de distribuição são fundamentais para garantir o nível de serviço desejado em condições onde nem a demanda, nem os tempos de entrega são conhecidos com certeza. Desta forma, perspectivas de pesquisas futuras consistem em formulações estocásticas onde os estoques sejam considerados como variáveis de primeiro estágio e as quantidades transportadas como variáveis de segundo estágio. Neste contexto, variáveis estocásticas poderiam ser definidas como demandas e/ou *leadtime* de cada modo de transporte em comparação com a formulação determinista proposta.

REFERÊNCIAS

- ABDELMAGUID, T. F. **Heuristic approaches for the integrated inventory distribution problem**. Los Angeles: University of Southern California, 2004.
- ABDELMAGUID, T. F.; DESSOUKY, M. M. A genetic algorithm approach to the integrated inventory-distribution problem. **International Journal of Production Research**, v. 44, n. 21, p. 37-41, 2006.
- ABSHIRE, R. D.; PREMEAUX, S. R. Motor carriers and shippers perception of the carrier choice decision. **Transportation Journal**, v. 31, n. 1, p. 31-35, 1991.
- AGRAWAL, N.; SMITH, S. A. Optimal inventory management for a retail chain with diverse store demands. **European Journal of Operational Research**, v. 225, n. 3, p. 393-403, 2013.
- AGUEZZOUL, A. Third-party logistics selection problem : A literature review on criteria and methods. **Omega**, v. 49, p. 69-78, 2014.
- ANAYA, J. J. T. **El transporte de mercancías: Enfoque Logístico de distribución**. Madrid: ESIC, 2009.
- ANDERSON, E. et al. What drives the choice of a third party logistics provider?. **Journal of Supply Chain Management: a global review of purchasing and supply**, v. 47, n. 2, p. 97-115, 2010.
- AUCAMP, D. Nonlinear freight costs in the EOQ problem. **European Journal of Operational Research**, v. 9, n. 1, p. 61-63, 1982.
- AYDINEL, M. et al. Optimization of production allocation and transportation of customer orders for a leading forest products company. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 48, n. 7-8, p. 1158-1169, out. 2008.
- BAITA, F. et al. Dynamic routing-and-inventory problems: a review. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 32, n. 8, p. 585-598, nov. 1998.
- BALL, M. O. et al. Planning for Truck Fleet Size in the Presence of a Common-Carrier Option. **Decision Sciences**, v. 14, n. 1, p. 103-120, jan. 1983.
- BALLOU, R. H. **Logística empresarial: Gerenciamento da cadeia de suprimentos**. 5. ed. Porto alegre: BOOKMAN, 2006.
- BARBOZA, P. D.; VIEIRA, J. G. V. Análise de decisão multicritério aplicada na seleção de investimento em armazenagem de soja em grão. **Produto & Produção**, v. 15, n. 2, p. 24-45, 2014.
- BARDI, B. et al. The Measurement of Quality Service and the Transportation Purchase Decision. **Logistics and Transportation Review**, v. 20, n. 1, p. 25-43, 1984.

- BARDI, E. J.; BAGCHI, P. K.; RAGHUNATHAN, T. S. Carrier Selection Environment in a Deregulated. **Transportation Journal**, v. 29, n. 1, p. 4-11, 1989.
- BARRON, F. H.; BARRET, B. E. The Efficacy of SMARTER – Simple Multi-Attribute Rating Technique Extended to Ranking. **Acta Psychologica**, v. 93, p. 23-36, 1996.
- BELL, W. et al. Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling optimizer. **Interfaces**, v. 13, n. 6, p. 4–23, 1983.
- BELTON, V.; STEWART, T. J. **Multiple Criteria Decision Analysis: an Integrated Approach**. New York: Springer, 2002.
- BERTAZZI, L.; PALETTA, G.; SPERANZA, M. G. Deterministic Order-Up-To Level Policies in an Inventory Routing Problem. **Transportation Science**, v. 36, n. 1, p. 119-132, 2002.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.
- BOLDUC, M. et al. A perturbation metaheuristic for the vehicle routing problem with private fleet and common carriers. **Journal of the Operational Research Society**, v. 59, p. 776-787, 2008.
- BOLDUC, M.-C.; RENAUD, J.; BOCTOR, F. A heuristic for the routing and carrier selection problem. **European Journal of Operational Research**, v. 183, n. 2, p. 926-932, dez. 2007.
- BRADSTTAW, J. M.; BOOSE, J. H. Decision analysis techniques for knowledge acquisition: combining information and preferences using Aquinas and Axotl. **Int. J. Man-Machine Studies**, v. 32, p. 121-186, 1990.
- CHAI, J.; LIU, J. N. K.; NGAI, E. W. T. Application of decision-making techniques in supplier selection : A systematic review of literature. **Expert Systems with Applications**, v. 40, p. 3872-3885, 2013.
- CHAN, F. T. S.; CHUNG, S. H. Multicriterion genetic optimization for due date assigned distribution network problems. **Decision Support Systems**, v. 39, p. 661-675, 2005.
- CHU, C.-W. A heuristic algorithm for the truckload and less-than-truckload problem. **European Journal of Operational Research**, v. 165, n. 3, p. 657-667, set. 2005.
- CINTRON, A.; RAVINDRAN, A. R.; VENTURA, J. A. Multi-criteria mathematical model for designing the distribution network of a consumer goods company. **Computers & Industrial Engineering**, v. 58, p. 584-593, 2010.
- COLTMAN, T.; DEVINNEY, T. M.; KEATING, B. Best–Worst Scaling Approach to Predict Customer Choice for 3PL Services. **Journal of Business Logistics**, v. 32, n. 2, p. 139–52, 2011.

- COSTA, J. P.; DIAS, J. M.; GODINHO, P. **Logística**. 1. ed. Coimbra: Imprensa da Universidade de Universidad de Coimbra, 2010. p. 246
- COULTER, R. L. et al. Freight Transportation Selection Criteria Carrier Identification of Service Dimensions for Competitive Positioning. **Journal of Business Research**, v. 19, p. 51-66, 1989.
- CRUM, M. R.; ALLEN, B. J. Carrier-Shipper Assessment Relationship of Motor Trends, 1990 vs. 1996. **Transportation Journal**, v. 37, n. 1, p. 5-17, 1997.
- CÔTÉ, J.-F.; POTVIN, J.-Y. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with private fleet and common carrier. **European Journal of Operational Research**, v. 198, n. 2, p. 464-469, out. 2009.
- DANIELIS, R.; MARCUCCI, E.; ROTARIS, L. Logistics managers' stated preferences for freight service attributes. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 41, n. 3, p. 201-215, maio. 2005.
- DE LA VEGA, D. S.; VIEIRA, J. G. V.; TOSO, E. A. V. Methodology for distribution centers location through multicriteria analysis and optimization. **Dyna**, v. 81, n. 184, p. 28-35, 2014.
- DESHPANDE, P.; SHUKLA, D.; TIWARI, M. K. Fuzzy goal programming for inventory management : A bacterial foraging approach. **European Journal of Operational Research**, v. 212, n. 2, p. 325-336, 2011.
- DROR, M.; BALL, M. O.; GOLDEN, B. L. A computational comparison of algorithms for the inventory routing problem. **Annals of Operations Research**, v. 4, p. 3-23., 1985.
- EDWARDS, W.; BARRON, F. SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, v. 60, p. 306-325, 1994.
- EKSIOGLU, S. D. A primal – dual algorithm for the economic lot-sizing problem with multi-mode replenishment. **European Journal of Operational Research**, v. 197, p. 93-101, 2009.
- EPPEN, G. D.; MARTIN, R. K. Determining safety stock in the presence of stochastic lead time and demand. **Management Research News**, v. 34, n. 11, p. 1380-1391, 1988.
- ESKIGUN, E. et al. Outbound supply chain network design with mode selection, lead times and capacitated vehicle distribution centers. **European Journal of Operational Research**, v. 165, n. 1, p. 182-206, ago. 2005.
- EVANS, R. E.; SOUTHARD, W. R. Motor carriers and shippers perceptions of the carrier choice decision. **The Logistics and Transportation Review**, v. 10, n. 2, p. 145-147, 1974.
- FARAHANI, R. Z.; ASGARI, N. Combination of MCDM and covering techniques in a hierarchical model for facility location: A case study. **European Journal of Operational Research**, v. 176, n. 3, p. 1839-1858, fev. 2007.

FARAHANI, R. Z.; STEADIESEIFI, M.; ASGARI, N. Multiple criteria facility location problems: A survey. **Applied Mathematical Modelling**, v. 34, n. 7, p. 1689-1709, 2010.

FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. ET AL. **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys**. Boston: Springer, 2005.

FLEURY, P. Gestão Estratégica do Transporte. **Centro de Estudos em Logística do COPPEAD/ UFRJ**. Rio de Janeiro, n 1, pp.1-8, Março, 2002. Disponível em <http://www.cel.coppead.com.br>.

GALO, N. R. **Critérios de seleção e indicadores de desempenho para contratação de serviços logísticos: um estudo de casos múltiplos com embarcadores e operadores logísticos**. Dissertação de mestado. Universidade Federal de São Carlos, 2014.

GEBENNINI, E.; GAMBERINI, R.; MANZINI, R. An integrated production–distribution model for the dynamic location and allocation problem with safety stock optimization. **International Journal of Production Economics**, v. 122, n. 1, p. 286-304, nov. 2009.

GHAREGOZLOO HAMEDANI, S.; JABALAMELI, M. S.; BOZORGI-AMIRI, A. A multi-objective model for locating distribution centers in a supply chain network considering risk and inventory decisions. **Management Science Letters**, v. 3, n. 4, p. 1077-1088, 1 abr. 2013.

GIBSON, B. J.; SINK, H. L.; MUNDY., R. A. Shipper-Carrier Relationships and Carrier Selection Criteria. **Logistics and Transportation Review**, v. 29, n. 4, p. 371–82., 1993.

GIGERENZER, G.; TODD, P. M. **simple heuristics that make us smart**. Oxford: Oxford University Press, 1999.

GOMES, L.; ARAYA, M.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisões em cenários complexos: introdução aos métodos discretos do apoio multicritério à decisão**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

GOMES, L.; GOMES, C.; ALMEIDA, A. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. São Paulo: Atlas, 2002.

GOODWIN, P.; WRIGHT, G. **Decision Analysis for Management Judgment**. 3. ed. England: John Wiley & Sons, 2005.

HALL, P. K.; WAGNER, B. Tank Truck Carrier Selection by Bulk Chemical Shippers: An Empirical Study. **Logistics and Transportation Review**, v. 32, n. 2, p. 231–245., 1996.

HANCZAR, P. An Inventory-Distribution System with LTL Deliveries – Mixed Integer Approach. **Procedia Social and Behavioral Sciences**, v. 20, p. 207-216, 2011.

HARRIS, F. W. How many parts to make at once. **Operations Research**, v. 38, p. 947-950, 1990.

HENING, M. I.; BUCHANAN, J. T. **In: Eleventh International Conference on Multiple Criteria Decision Making**. Decision making by multiple criteria: a concept of solution. **Anais**. Coimbra: 1994

HO, W.; EMROUZNEJAD, A. Expert Systems with Applications Multi-criteria logistics distribution network design using SAS / OR. **Expert Systems With Applications**, v. 36, n. 3, p. 7288-7298, 2009.

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, p. 16-24, 2010.

HOWARD, R. A.; MATHESON, J. E. **Readings on the Principles and Applications of Decision Analysis**. Menlo Park, California: Strategy Decisions Group, 1984.

HUANG, I. B.; KEISLER, J.; LINKOV, I. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences : Ten years of applications and trends. **Science of the Total Environment**, v. 409, p. 3578-3594, 2011.

HWANG, H.; MOON, D.; SHINN, S. An EOQ model with quantity discounts for both purchasing price and freight cost. **Computers and Operations Research**, v. 17, p. 73–78, 1990.

IWANIEC, K. An inventory model with full load ordering. **Management Science**, v. 25, p. 374–384, 1979.

JARUPHONGSA, W.; ÇETINKAYA, S.; LEE, C.-Y. A dynamic lot-sizing model with multi-mode replenishments: polynomial algorithms for special cases with dual and multiple modes. **IIE Transactions**, v. 37, n. 5, p. 453-467, 23 mar. 2005.

JERMAN, R. E.; ANDERSON, R. D.; CONSTANTIN, J. A. Shipper Versus Carrier Perceptions of Carrier Selection Variables. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 9, n. 1, p. 29-38, 1978.

JHA, A. et al. Minimizing transportation cost of a joint inventory location model using modified adaptive differential evolution algorithm. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 60, n. 1-4, p. 329-341, 14 set. 2011.

KANG, J.-H.; KIM, Y.-D. Coordination of inventory and transportation managements in a two-level supply chain. **International Journal of Production Economics**, v. 123, n. 1, p. 137-145, jan. 2010.

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.; GREGORY, R. S. Selecting attributes to measure the achievement of objective. **Operations Research**, v. 53, p. 1-11, 2005.

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

KEENEY, R. L.; WINTERFELDT, D. Practical Value Models. **published articles & Paper**, v. 36, 2009.

- KIM, J.; KIM, Y. A decomposition approach to a multi-period vehicle scheduling problem. **Omega**, *Int. J. Mgmt. Sci.*, v. 27, p. 421-430, 1999.
- KIM, J.; KIM, Y. A Lagrangian relaxation approach to multi-period inventory / distribution planning. **Journal of the Operational Research Society**, v. 51, n. 3, p. 364-370, 2000.
- KLINCEWICZ, J. G.; H. LUSS, M. G. P. Fleet size planning when outside carrier service are available. **Transportation Science**, v. 24, p. 169–182, 1990.
- KRATICA, J. et al. A genetic algorithm for the routing and carrier selection problem. **Computer Science and Information Systems**, v. 9, n. 1, p. 49-62, 2012.
- KULAK, O.; KAHRAMAN, C. Fuzzy multi-attribute selection among transportation companies using axiomatic design and analytic hierarchy process. **Information Sciences**, v. 170, p. 191-210, 2005.
- KUTANOGLU, E.; LOHIYA, D. Integrated inventory and transportation mode selection: A service parts logistics system. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 44, n. 5, p. 665-683, 2008.
- LEE, C.-Y. The Economic Order Quantity for Freight Discount Costs. **IIE Transactions**, v. 18, n. 3, p. 318-320, 1986.
- LI, C.; HSU, V. N.; XIA, W.-Q. Dynamic Lot Sizing with Batch Ordering and Truckload Discounts. **Operation Research**, v. 52, n. 4, p. 639-654, 2004.
- LI, Y.; SU, Q.; LI, T. **Transportation and Inventory Cost Based on Time in Supply Chain Logistics System**. Logistics Engineering and Intelligent Transportation Systems (LEITS), 2010 International Conference. **Anais**. Wuhan: 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5664999>>
- LIPPMAN, S. Optimal inventory policy with multiple set-up costs. **Management Science**, v. 16, p. 118–138, 1969.
- LIU, K.; ZHOU, Y.; ZHANG, Z. Capacitated location model with online demand pooling in a multi-channel supply chain. **European Journal of Operational Research**, v. 207, n. 1, p. 218-231, 2010.
- LIU, L.; YE, C. **An improved heuristic algorithm for the problem of inventory — transportation integrated optimization**. 2009 International Conference on Management Science and Engineering. **Anais**. Moscow, Russia: Ieee, set. 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5317676>>
- LOKEN, E.; BOTTERUD, A.; HOLEN, A. T. Use of the equivalent attribute technique in multi-criteria planning of local energy systems. **European Journal of Operational Research**, v. 197, p. 1075-1083, 2009.
- LU, C.-S. The impact of carrier service attributes on shipper–carrier partnering relationships: a shipper’s perspective. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 39, n. 5, p. 399-415, 2003.

MACIEL, R. S. **Otimização Multiobjetivo na Análise da Integração de Geração Distribuída às Redes de Distribuição**. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, 2012.

MADADI, A.; KURZ, M. E.; ASHAYERI, J. Multi-level inventory management decisions with transportation cost consideration. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 46, n. 5, p. 719-734, set. 2010.

MEIXELL, M. J.; NORBIS, M. A review of the transportation mode choice and carrier selection literature. **The International Journal of Logistics Management**, v. 19, n. 2, p. 183-211, 2008.

MELO, M. T.; NICKEL, S.; SALDANHA-DA-GAMA, F. Facility location and supply chain management – A review. **European Journal of Operational Research**, v. 196, n. 2, p. 401-412, jul. 2009.

MENDOZA, A.; VENTURA, J. A. Incorporating quantity discounts to the EOQ model with transportation costs. **International Journal of Production Economics**, v. 113, n. 2, p. 754-765, jun. 2008.

MIN, H. A PERSONAL-COMPUTER ASSISTED DECISION SUPPORT SYSTEM. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 34, n. 3, p. 229-241, 1998.

MOHAMMADITABAR, D.; TEIMOURY, E. Integrated Freight Transportation Carrier Selection and Network Flow Assignment: Methodology and Case Study. **Journal of Applied Sciences**, v. 8, n. 17, p. 2928-2938, 2008.

MUNSON, C.; ROSENBLATT, M. Theories and realities of quantity discounts: An exploratory study. **Production and Operations Management**, v. 7, p. 352–369, 1998.

MURPHY, P. R.; DALEY, J. M.; HALL, P. K. Carrier selection: Do shippers and carriers agree, or not? **Transpn res. E (Logistics transpn rev.)**, v. 33, n. 1, p. 67-72, 1997.

MUSTAJOKI, J.; HAMALAINEN, R.; LINDSTEDT, M. Using Intervals for Global Sensitivity and Worst-Case Analyses in Multiattribute Value Trees. **European Journal of Operational Research**, v. 174, n. 1, p. 278-292, 2006.

NAHMIAS, S. **Production and Operations Analysis**. 4. ed. Boston, MA.: McGraw-Hill, 2001.

NUNKAEW, W.; PHRUKSAPHANRAT, B. **A Fuzzy Multiple Objective Decision Making Model for Solving a Multi-Depot Distribution Problem**. International MultiConference of Engineers and Computer Scientists IMECS. **Anais**. Hong Kong: 2010

OLIVEIRA, L. S. DE; SARAMAGO, S. F. P. Multiobjective Optimization Techniques Applied to Engineering Problems. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 32, n. 1, p. 94-105, 2010.

- OZERNOY, V. M. Choosing the Best Multiple Criteria Decision-Making Method. **INFOR**, v. 30, n. 2, p. 159-171, 1992.
- PARVEEN, S. Multi-Criteria Optimization in Logistical Distribution in a Supply Chain. **International Journal of Emerging trends in Engineering and Developmen**, v. 7, n. 2, p. 309-318, 2012.
- PENG, J. Selection of Logistics Outsourcing Service Suppliers Based on AHP. **Energy Procedia**, v. 17, p. 595-601, 2012.
- RIEKSTS, B. Q.; VENTURA, A. Optimal inventory policies with two modes of freight transportation. **European Journal of Operational Research**, v. 186, p. 576-585, 2008.
- RIEKSTS, B. Q.; VENTURA, J. A. Two-stage inventory models with a bi-modal transportation cost. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 1, p. 20-31, jan. 2010.
- RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2003.
- SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. N. York, USA: McGraw-Hill, 1980.
- SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83, 2008.
- SADJADY, H.; DAVOUDPOUR, H. Research Two-echelon , multi-commodity supply chain network design with mode selection , lead-times and inventory costs. **Computers and Operation Research**, v. 39, n. 7, p. 1345-1354, 2012.
- SANAYEI, A. et al. An integrated group decision-making process for supplier selection and order allocation using multi-attribute utility theory and linear programming. **Journal of the Franklin Institute**, v. 345, p. 731-747, 2008.
- SHU, J. et al. A logistics network design model with vendor managed inventory. **Intern. Journal of Production Economics**, v. 135, n. 2, p. 754-761, 2012.
- SHU, J.; TEO, C.-P.; SHEN, Z.-J. M. Stochastic Transportation-Inventory Network Design Problem. **Operations Research**, v. 53, n. 1, p. 48-60, 2005.
- SUBRAMANIAN, N.; RAMANATHAN, R. A review of applications of Analytic Hierarchy Process in operations management. **International Journal of Production Economics**, v. 138, n. 2, p. 215-241, 2012.
- SWENSETH, S. R.; GODFREY, M. R. Incorporating transportation costs into inventory replenishment decisions. **International Journal of Production Economics**, v. 77, p. 113-130, 2002.
- TANCREZ, J.-S.; LANGE, J.-C.; SEMAL, P. A location-inventory model for large three-level supply chains. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 48, n. 2, p. 485-502, 2012.

TERSINE, R. J.; BARMAN, S. Optimal Lot Sizes for Unit and Shipping Discount Situations. **IIE Transactions**, v. 26, n. 2, p. 97-101, 1994.

TOPTAL, A.; BINGÖL, S. O. Transportation pricing of a truckload carrier. **European Journal of Operational Research**, v. 214, n. 3, p. 559-567, 2011.

VAIDYA, O. S.; KUMAR, S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. **European Journal of Operational Research**, v. 169, n. 1, p. 1-29, 2006.

VARIAN, H. **Microeconomia: Princípios básicos, uma abordagem moderna**. 7. ed. Doninello., Ed. Campus. Tradução Maria José Cylhar Monteiro e Ricardo Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

VON NEUMANN, J. MORGENSTERN, O. **Theory of Games and Economic Behavior**. New York: Wiley, 1953.

VON WINTERFELDT, D.; EDWARDS, W. **Decision Analysis and Behavioral Research**. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.

VOSS, M. D. et al. Reasoned Action Important Determining A Fresh Perspective Attributes : Using Action of Reasoned the Theory. **Transportation Journal**, v. 45, n. 3, p. 7-19, 2006.

WALLENIUS, J. et al. Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory : Recent Accomplishments and What Lies Ahead. **Management Science**, v. 54, p. 1336 - 1349, 2008.

WILLIAMS, Z.; GARVER, M. S.; TAYLOR, G. S. Carrier Selection : Understanding the Needs of Less-than-Truckload Shippers Carrier Selection. **Transportation Journal**, v. 52, n. 2, p. 151-182, 2013.

YIN, R. K. **Estudo de caso: Planejamento e métodos**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

ZHAO, Q. H. et al. Integration of inventory and transportation decisions in a logistics system. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 46, n. 6, p. 913-925, 2010.

ZHAO, Q.-H. et al. Model and algorithm of an inventory problem with the consideration of transportation cost. **Computers & Industrial Engineering**, v. 46, n. 2, p. 389-397, 2004.

APÊNDICES

A - Axiomas da teoria da utilidade

Os axiomas da teoria da utilidade apresentados a seguir estão detalhados em Russel e Norving (2003)

Axioma 1: Ordenabilidade (A.1). Dados duas loterias quaisquer, um decisor racional deve preferir uma à outra ou então classificar as duas como igualmente preferíveis. O tomador de decisão não pode evitar a decisão.

$$(A \succ B) \vee (B \succ A) \vee (A \sim B) \quad (A.1)$$

Axioma 2: Transitividade (A.2). Dadas três loterias quaisquer, se o decisor preferir A a B e preferir B a C , então ele deverá preferir A a C .

$$(A \succ B) \wedge (B \succ C) \Rightarrow (A \succ C) \quad (A.2)$$

Axioma 3: Continuidade (A.3). Para uma loteria B preferida entre A e C , existe uma probabilidade p para o qual o decisor é indiferente entre escolher B por garantia ou escolher uma loteria que oferece A com probabilidade p e C com probabilidade $1 - p$ (Figura A.1).

$$A \succ B \succ C \Rightarrow \exists p/[p, A; 1 - p, C] \sim B \quad (A.3)$$

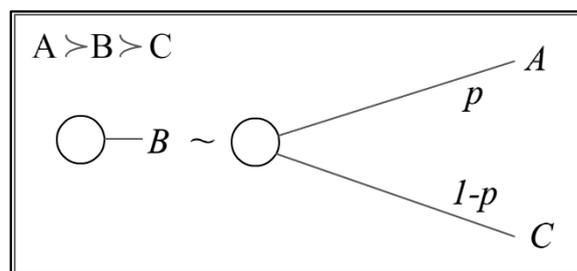


Figura A.1 - Axioma da continuidade

Axioma 4: Substituibilidade (A.4). Se o decisor é indiferente entre duas loterias A e B , então o decisor está indiferente entre duas outras loterias complexas que são a mesma loteria, exceto pelo fato de A ser substituído por B em um delas. Isso é válido independentemente das probabilidades e do(s) outro(s) resultado(s) das loterias (Figura A.2).

$$A \sim B \Rightarrow [p, A; 1 - p, C] \sim [p, B; 1 - p, C] \quad (A.4)$$

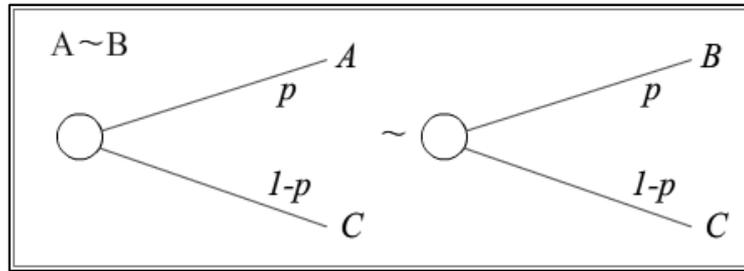


Figura A.2 - Axioma da substituiuibilidade

Axioma 5: Monotonicidade (A.5). Para duas loterias com os mesmos, o decisor deverá preferir a loteria que oferece uma probabilidade maior para o resultado mais desejado (Figura A.3).

$$A > B \Rightarrow (p \geq q \Leftrightarrow [p, A; 1 - p, B] \succeq [q, A; 1 - q, B]) \quad (A.5)$$

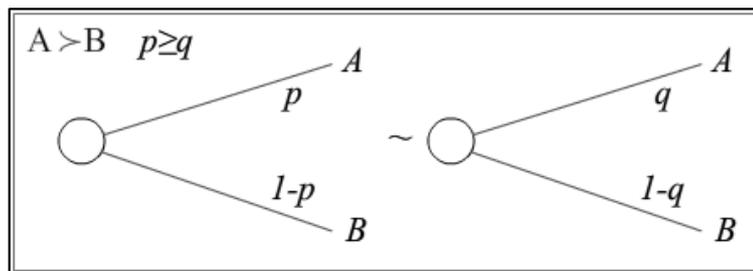


Figura A.3 - Axioma da monotonicidade

Axioma 6: Decomponibilidade (A.6). As loterias compostas podem ser reduzidas a loterias mais simples através das leis da probabilidade. Assim, duas loterias consecutivas podem ser compactadas em uma única loteria equivalente (Figura A.4).

$$[p, A; 1 - p, [q, B; 1 - q, C]] \sim [p, A; (1 - p)q, B; (1 - p)(1 - q), C] \quad (A.6)$$

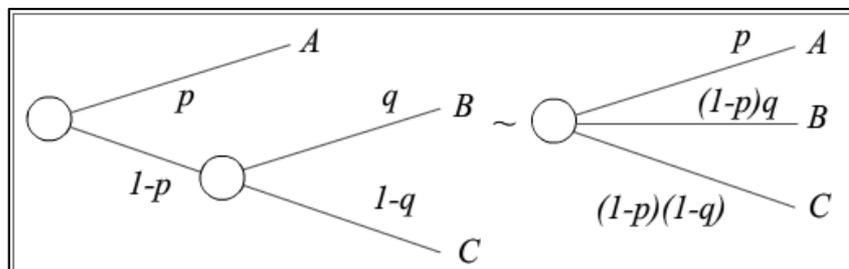


Figura A.4 - Axioma da decomponibilidade

B - Levantamento de curvas de utilidade: método de certeza equivalente

O método de certeza equivalente ou também chamado "equivalente certo" exige ao tomador de decisão a pensar em termos de apostas 50/50. Para ilustrar como o método é aplicado considera-se uma adaptação do exemplo de Varian (2006).

Os possíveis retornos financeiros de realizar um projeto são apresentados na Tabela B.1. Esses retornos estariam baseados nos custos das tecnologias adquiridas, na mão de obra empregada, na possível demanda, entre outros elementos conhecidos.

Tabela B.1 - Exemplo: Retornos financeiros

Projetos	Retorno financeiro
A	R\$55.000
B	R\$30.000
C	R\$10.000
D	-R\$5.000

Uma sessão de elicitación típica do método de certeza equivalente pode proceder da seguinte forma:

Iteração 1

Analista: “Para um bilhete de loteria hipotética com uma chance de 50% de obter um projeto com -R\$5.000 de retorno e 50% de chance de obter um projeto com R\$55.000 de retorno, quanto você estaria disposto a pagar por isso? Obviamente, o valor monetário esperado é de R\$25.000, mas é importante saber a quantidade máxima de dinheiro que estaria disposto a pagar pelo bilhete”.

Decisor: (depois de algum tempo pensando) “R\$10.000”

$$\text{Assim } u(10.000) = 0.5u(55.000) + 0,5u(-5.000) = 0,5(1) - 0,5(0) = 0,5$$

Iteração 2

O analista agora usaria os R\$10.000 como o pior retorno em uma nova loteria hipotética, da seguinte forma:

Analista: “Se eu agora lhe ofereço um bilhete de loteria hipotética que lhe deu uma chance de 50% de obter um projeto com R\$55.000 de retorno financeiro e 50% de chance de obter um projeto com retorno de R\$10.000, quanto você estaria disposto a pagar?”.

Decisor: “Cerca de R\$ 30.000”

$$\text{Assim } u(18.000) = 0.5u(55.000) + 0,5u(10.000) = 0,5(1) + 0,5(0,5) = 0,75$$

Iteração 3

O valor de R\$10.000 também é usado como o melhor retorno em uma loteria que também vai oferecer a chance de obter um projeto com perda de R\$5.000, como segue:

Analista: “Quanto você estaria disposto a pagar por um bilhete que lhe oferece uma chance de 50% de obter um projeto com retorno de R\$10.000 e uma chance de 50% de obter um projeto com retorno de -R\$5.000?”.

Decisor: “Máximo R\$3.000”.

$$\text{Assim } u(3.000) = 0,5u(10.000) + 0,5u(-5.000) = 0,5(0,5) + 0,5(0) = 0,25$$

O efeito deste procedimento é extrair os valores monetários que tenham utilidades de 0, 0.25, 0.5, 0.75 e 1. A Figura 3.3 apresenta a função de utilidade para o decisor no exemplo.

Tabela B.2 - Exemplo: Retornos financeiros

Projetos	Retorno Financeiro	Utilidade
1	R\$ 55.000	1,00
2	R\$ 30.000	0,75
3	R\$ 10.000	0,50
4	R\$ 3.000	0,25
5	-R\$ 5.000	0,00

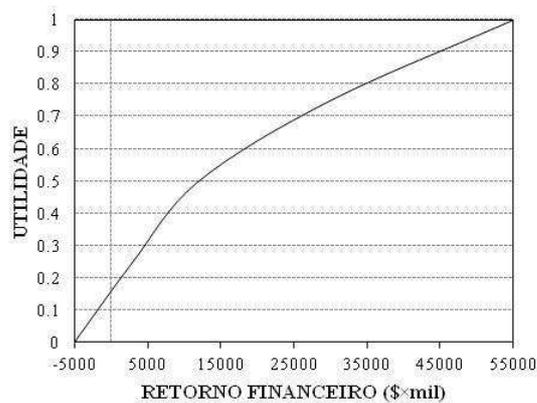


Figura B.0.1 - Função de utilidade para retorno financeiro

C - Processo de análise hierárquico: Etapas

Os passos do AHP como definido por Saaty (2008) são, basicamente, a comparação entre pares de critérios, a determinação do índice de inconsistência e cálculo do vetor de prioridades. Apresentam-se neste apêndice os passos através de um exemplo para priorizar três critérios.

Comparação entre pares de critérios

Utiliza-se a escala fundamental de Saaty (2008). Um número é atribuído para cada comparação entre todos os atributos. A Tabela C.1 apresenta os julgamentos de um decisor que considera ao Critério A três vezes mais importante (3) que o critério B, e igualmente importante (1) que o critério C. Por outro lado, o critério B é duas vezes menos importante (1/2) que o critério C.

Tabela C.1 - Exemplo tabela de comparações AHP

Critérios	Critério A	Critério B	Critério C
Critério A	1	3	1
Critério B	1/3	1	1/2
Critério C	1	2	1

Observa-se na Tabela que existe reciprocidade nas comparações. Pois se A é três vezes mais importante (3) que B, então B é três vezes menos importante (1/3) que A.

Determinação do índice de inconsistência

Inicialmente determina-se o quadrado da matriz de julgamentos (A^2). Após, determina-se o Autovetor (V) da matriz, como definidos na Equação (C.1). Onde a'_{ij} é o elemento da fila i e coluna j da matriz A^2 . Após, o Autovetor é normalizado para obter o Eigen-vetor (W), como apresentado na Equação (C.2).

$$V_i = \sum_{j=1}^n a'_{ij} \quad (C.1)$$

$$W_i = V_i / \sum_{i=1}^n V_i \quad (C.2)$$

O próximo passo consiste em determinar o Autovalor da matriz (λ_{max}) como definido na equação (C.3). O resultado do produto entre o vetor soma e o Eigen-vetor é um valor escalar (λ_{max}).

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \times W_i \right) \quad (C.3)$$

A Tabela C.2 apresenta os elementos da matriz A^2 , bem como o autovetor, eigen-vetor e o autovetor resultante.

Tabela C.2 - Cálculo do Autovetor

Critérios	Critério A	Critério B	Critério C	V	Eigen-vetor (W)
Critério A	3,0	3,5	8,0	14,50	0,44
Critério B	2,7	3,0	7,0	12,67	0,39
Critério C	1,2	1,3	3,0	5,50	0,17
Soma	2,33	2,50	6,00		$\lambda_{max}= 3,20$

Finalmente determina-se o índice de inconsistência para avaliar se os julgamentos do decisor são razoáveis. A equação (C.4) apresenta o cálculo, sendo n o número de critérios e R.I. (Razão de inconsistência) uma constante definida por Saaty (1980), também dependente do numero de critérios (Tabela C.3).

$$\text{Ind. I} = [(\lambda_{max} - n)/(n - 1)] / R. I. \quad (C.4)$$

Tabela C.3 - Cálculo do Autovetor

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R.I.	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,51	1,56

Para o exemplo, R.I.=0,52 definido em base aos três critérios comparados. Assim, o índice de inconsistência determinado através da equação (C.4) foi 0,19. Este índice alerta ao analista sobre inconsistências nas comparações que têm sido feitas, com valor de zero para a consistência perfeita. Saaty (2008) sugere que para um índice de inconsistência maior a 0,1, como regra geral, as comparações devem ser reexaminadas.

Determinação do vetor de prioridade

O Eigen-vetor da uma ideia ao decisor sobre a hierarquia dos critérios. No entanto, o cálculo deve ser realizado sobre a matriz A^n . Portanto, para o exemplo anterior, a matriz A^3 foi determinada e com ela o vetor de prioridade $W = [44,3 \ 38,7 \ 16,9]$.

Devido aos números cálculos deste método, quando muitos critérios são comparados, pacotes computacionais como *ExpertChoice* ou *Matlab* ajudam a obter os resultados.

D - Definições dos critérios

Tabela 01 - Definições dos critérios de primeiro nível. Fonte: Coulter et al. (1989)

Critérios de primeiro nível	Abreviação	Definição
Eficiência operacional e confiabilidade de desempenho	Eficiência operacional	Diz sobre o desempenho das operações básicas do transporte em procura de garantir a eficácia e eficiência.
Segurança na prestação de serviço	Segurança do serviço	Diz sobre o fornecimento de um serviço de baixo risco para os clientes. Entende-se baixo risco como baixa taxa de dano e perda, a cobertura do transporte, serviço de reivindicações, entre outros.
Atendimento ao cliente	Atendimento ao cliente	Diz respeito aos serviços de atendimento oferecidos pelo modo de transporte
Fator de manipulação / manuseio	Fator de manipulação	Diz sobre a facilidade, qualidade e conveniência de instalações, arranjos e recursos, que resultam em um mínimo esforço do embarcador para a movimentação da carga.
Fator de personalização	Fator de personalização	Diz sobre a capacidade do transporte para prover uma imagem mais própria. Refere-se ao grau de envolvimento do embarcador com a sua carga

Tabela 02 - Definições de critérios. Fonte: Coulter et al. (1989), Bardi, Bagchi e Raghunathan (1989), Costa, Dias e Godinho (2010), Williams, Garver e Taylor (2013)

Critérios de segundo nível	Abreviação	Definição
Custo de transporte	C. Transporte	Valor cobrado pelo frete, considerando o custo de deslocamento, taxas e seguro.
Custo de manutenção de estoque	C. Estoque	Refere-se aos custos financeiros de manter unidades em estoque
Custo de estoque em trânsito	C. Est. Trânsito	Refere-se aos custos financeiros de manter unidades em trânsito
Velocidade do transporte	Velocidade	Diz sobre o tempo necessário para a entrega de uma carga
Confiabilidade do tempo em trânsito	Confiabilidade	Capacidade de cumprir com o tempo em trânsito acordado
Serviço de coleta confiável	Coleta confiável	Diz sobre o cumprimento das datas e horário de coleta definidos
Baixo erro de entrega	Erro de entrega	Diz sobre a probabilidade de uma entrega na quantidade ou localização não desejada.
Frequência de serviço	Frequência	Diz sobre a disponibilidade do modo de transporte para ser usado.
Possibilidade de perda e dano	Perda e dano	Diz sobre o risco de perda, dano do produto no transporte; responsabilidade da perda.
Cuidado e limpeza	Cuidado/limpeza	Diz sobre segurança e higiene. Capacidade do modo de transporte para prevenir roubo.
Histórico de desempenho do transporte	Histórico	Diz sobre as experiências ou desempenho passado do modo de transporte.
Reputação pela qualidade do serviço e confiabilidade	Reputação	Diz respeito à imagem do modo de transporte oferecido ao longo da parceria.
Resposta rápida em situações de	Resposta rápida	Capacidade em lidar com a demanda extra e sobre a resposta rápida em situações de

emergência	emergência
Cobertura geográfica do transporte e acesso	Cobertura e acesso
Serviços de documentação e faturamento	Documentação
Qualidade do pessoal de transporte	Qualidade do pessoal
Cooperação entre o transportador e carregador	Cooperação
Comunicação frequente com o transportador	Comunicação
Serviços de distribuição internacional	Distr. Internacional
Tecnologia de informação, armazenamento e transporte.	T.I.
Facilidade para fazer mudanças em embarques expedidos	Mudanças
Programações flexíveis	Prog. Flexível
Limitações de capacidade de carga	Capacidade
Facilidade nas operações de carga e descarga	Op. Carga/descarga
Rastreamento do embarque	Rastreamento
Capacidade para transportar produtos especiais	Transp. especiais
Compatibilidade das estratégias	Compatibilidade
Possibilidade de relacionamento em longo prazo	Relacionamento
Taxas flexíveis	Taxas flexíveis
	<p>Capacidade em suprir as demandas em diversas cidades, regiões e estados, bem como a facilidade de acesso a grandes cidades.</p> <p>Sobre os serviços para a documentação do controle das operações. Realização de faturas e comprovantes com precisão. Processamento e acompanhamento de reclamações.</p> <p>Diz sobre a eficiência, cuidado, responsabilidade e outras dimensões, do pessoal que encarregado transporte.</p> <p>Diz sobre o relacionamento de parceria e colaboração. Relaciona-se com a percepção do embarcador da facilidade com que os negócios são conduzidos com o transportador.</p> <p>Diz sobre a facilidade de comunicação e sobre a facilidade de trabalhar com o transportador com compartilhamento de informações.</p> <p>Diz sobre o escopo para prestação de serviços logísticos internacionais.</p> <p>Capacidade tecnológica para controle e gestão das atividades logísticas.</p> <p>Diz sobre a disposição do modo de transporte para permitir mudanças na carga após ela é expedida, seja para mudar o destino da carga ou a quantidade enviada a cada cliente.</p> <p>Facilidade para programar quando uma carga deve ser expedida</p> <p>Sobre a capacidade do transporte, ou pela frota disponível.</p> <p>Diz sobre a comodidade que fornece o modo de transporte para a carga do produto no ponto de coleta e descarga no ponto destino</p> <p>Sobre a capacidade para localizar a carga em tempo real durante toda a operação de transporte.</p> <p>Diz sobre a disposição e habilidade do modo de transporte para movimentar produtos que solicitem de manuseio e tratamento especial.</p> <p>Diz sobre a adequação ou afinidade das políticas e cultura organizacional com um determinado modo de transporte.</p> <p>Diz sobre a possibilidade de obter benefícios em longo prazo ou na medida em que o transportador deseja premiar e construir confiança mútua com seu embarcador.</p> <p>Diz sobre a disposição do transportador para negociar a tabela de preços.</p>

E - Roteiro da entrevista

1. Perfil do decisor:

- Qual a profissão do entrevistado?
- Qual o cargo atual do entrevistado dentro da empresa?
- Quais são as principais funções do cargo?
- Quantos o tempo de experiência no cargo?
- Qual a idade do entrevistado?
- Qual o número de funcionário sob a responsabilidade do entrevistado?
- Para qual cargo o entrevistado reporta?
- Está satisfeito com o método atual da empresa de programação da distribuição?
- Está satisfeito com o método atual da empresa de determinação das políticas de estoque?
- O entrevistado acredita que um modelo, composto por medidas bem definidas e considerando as preferências dos decisores, poderia melhorar a programação da distribuição e políticas de estoque?

2. Determinação dos objetivos fundamentais:

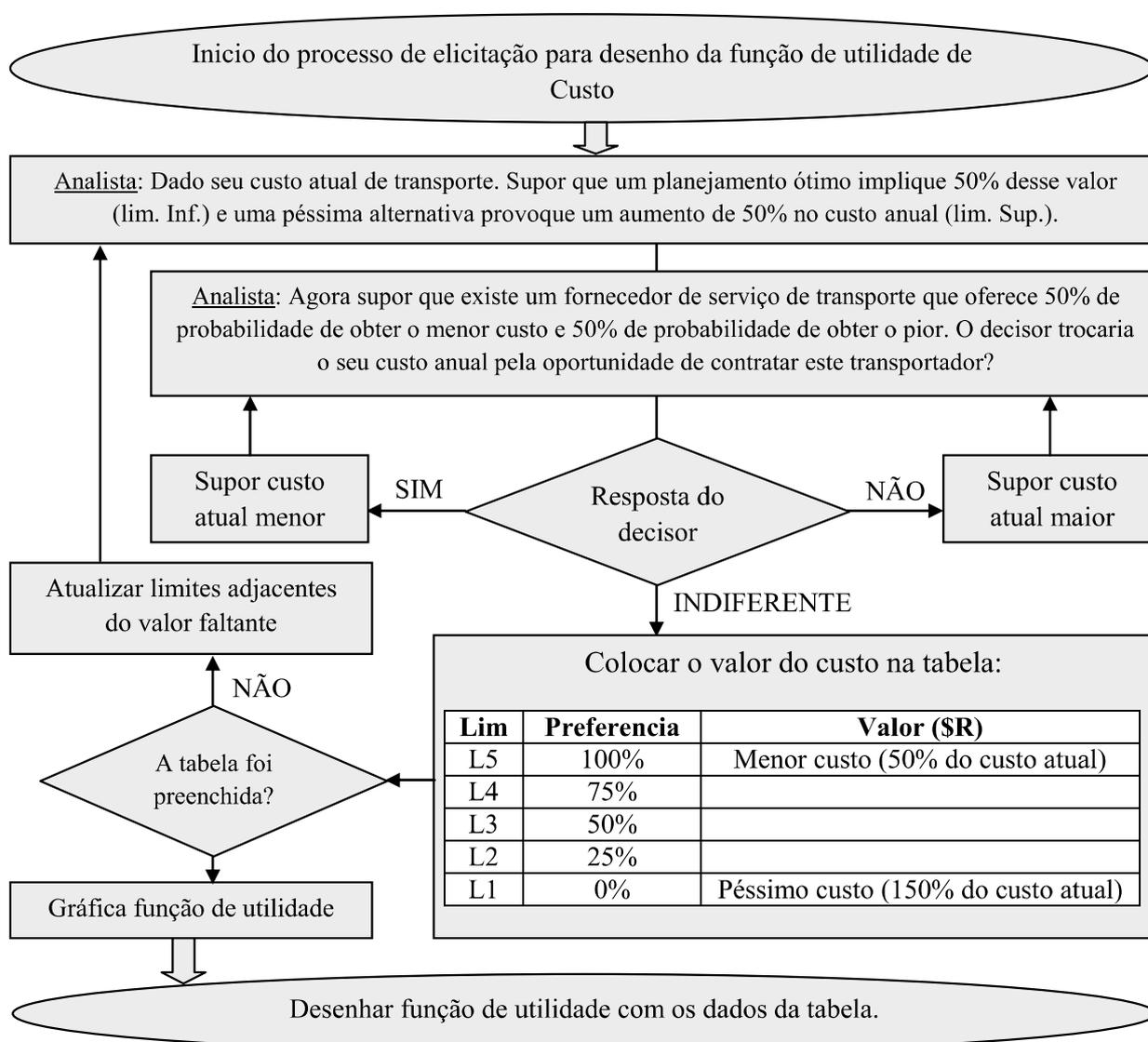
Indique os critérios que considere relevantes no momento de decidir entre os dois modos de transporte de carga (FTL ou LTL). Considere 1 (Irrelevante), 2 (Pouco relevante), 3 (Relevante), 4 (Muito relevante) e 5 (Imprescindível) e faça um X no valor da nota:

Tabela 01 – Questionário para avaliação de preferências

Nº	CRITÉRIOS	ABREV	DM1				
			1	2	3	4	5
1	Custo de transporte	CTRANSP					
2	Custo de manutenção de estoque	CESTOQ					
3	Custo de estoque em trânsito	C.EST-TR					
4	Velocidade do transporte (tempo em trânsito)	VELOCD					
5	Confiabilidade do tempo em trânsito	CONFIAB					
6	Serviço de coleta confiável	COLETA					
7	Erro de entrega	ENTREGA					
8	Frequência de serviço	FREQ					
9	Possibilidade de perda e dano	PERD/DANO					
10	Cuidado e limpeza/ segurança e higiene	SEG/HIG					
11	Histórico de desempenho do transporte	HISTORICO					
12	Reputação pela qualidade do serviço	REPUT					
13	Resposta rápida em situações de emergência	RESPOSTA					
14	Cobertura geográfica do transporte e acesso	ACESSO					
15	Serviços de documentação e faturamento	FATURA					
16	Qualidade do pessoal de transporte	QPESSOAL					
17	Cooperação entre o pessoal de transporte e carregador	COOPER					
18	Comunicação frequente com o transportador	COMUNIC					
19	Serviços de distribuição internacional	INTERN					
20	Tecnologia de informação, armazenamento e transporte.	TI					

21	Facilidade para fazer mudanças em embarques expedidas	MUDANÇ				
22	Programações flexíveis	PRG-FLEX				
23	Limitações de capacidade da carga	CAPAC				
24	Processamento de reclamações	RECLM				
25	Facilidade nas operações de carga e descarga	CARG/DESC				
26	Rastreamento do embarque	RASTR				
27	Capacidade para transp. produtos especiais	TRANSP-ESP				
28	Compatibilidade das estratégias	COMPAT				
29	Possibilidade de relacionamento em longo prazo	RELAC				
30	Taxas flexíveis	TAX-FLEX				

3. Fluxograma utilizado para obtenção das curvas de utilidade dos critérios quantitativos



Nota: Para a obtenção das curvas de utilidade dos outros critérios quantitativos foram aplicados fluxogramas semelhantes.

ANEXOS

A - Informações do sistema de distribuição real utilizadas nos estudos computacionais

Este anexo apresenta as informações proporcionalmente modificadas do sistema de distribuição real de uma empresa do sector das telecomunicações utilizadas nos estudos computacionais.

Alguns dados simulados para o exemplar em particular são também apresentados.

- Número de centros de distribuição (*CD*): 2
- Número total de clientes ou centros de distribuição regionais (*CL*): 70
- Número de tipos de veículos FTL disponíveis (*K*): 5
- Número de períodos de tempo no horizonte de planeamento (*T*): 26
- Número de faixas de custo no embarque LTL (*S*): 3
- Nível de serviço desejado (*NS*): 80%; valor *Z*: 0,84.

Tabela A.1 – Capacidade para os tipos de veículos FTL disponíveis

	Tipo de Veiculo	Capacidade (m ³)
CARRETA	1	90
TOCO	2	36
MÉDIO	3	12
V.U.C.	4	6
SPRINTER	5	4

Tabela A.2 - Capacidade de armazenagem dos clientes (m³).

Clientes ou centros de distribuição regionais													
1	500	11	218	21	259	31	300	41	400	51	400	61	252
2	300	12	204	22	400	32	400	42	260	52	400	62	235
3	400	13	232	23	210	33	500	43	238	53	500	63	202
4	400	14	300	24	233	34	500	44	216	54	400	64	262
5	500	15	221	25	203	35	300	45	238	55	246	65	279
6	400	16	277	26	251	36	202	46	243	56	205	66	278
7	263	17	209	27	298	37	288	47	500	57	299	67	215
8	241	18	500	28	281	38	200	48	400	58	291	68	400
9	236	19	500	29	500	39	269	49	500	59	400	69	400
10	291	20	400	30	400	40	400	50	400	60	288	70	202

Tabela A.3 – Previsão da demanda dos clientes por período (m³)

	Períodos (semanas)																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26				
1	16	18	24	12	18	11	10	13	29	14	6	21	13	6	0	23	7	18	7	29	7	8	2	20	10	30				
2	8	16	7	3	5	10	1	13	9	13	16	9	10	16	11	14	2	2	2	1	15	0	9	4	10	0				
3	22	15	0	25	36	38	34	9	16	37	16	18	29	9	26	2	21	24	26	15	21	0	24	40	8	29				
4	15	27	10	10	25	22	27	16	5	12	19	20	28	18	5	21	9	18	25	6	12	27	9	24	10	25				
5	21	14	30	5	15	2	28	16	22	9	28	26	22	4	24	30	13	9	20	30	30	36	34	4	31	4				
6	8	2	9	6	9	15	0	6	15	15	6	3	1	9	14	5	0	7	10	0	14	15	4	0	7	1				
7	25	39	20	5	6	29	15	6	44	22	40	4	47	26	2	21	13	21	18	5	21	21	20	17	32	12				
8	8	14	10	1	6	2	14	6	13	4	8	2	10	0	9	7	6	11	8	5	7	4	9	14	4	0				
9	7	11	3	4	12	1	9	6	10	10	6	10	11	3	11	10	8	11	2	1	9	6	3	11	3	3				
10	9	6	13	5	0	0	12	4	14	3	5	7	13	4	7	11	10	0	14	9	16	7	11	12	5	8				
11	14	13	3	0	10	16	11	18	0	3	5	14	14	3	9	15	1	23	6	21	22	1	21	1	9	23				
12	6	11	0	2	8	11	0	10	11	1	7	11	7	7	12	2	12	3	4	9	1	12	3	8	3	3				
13	17	9	19	8	4	32	8	19	31	16	13	8	20	13	28	18	23	13	26	27	16	10	13	1	1	15				
14	10	15	13	12	18	0	5	9	15	7	0	6	3	13	15	0	2	0	6	9	13	18	16	18	11	10				
15	11	14	13	7	20	8	15	18	19	22	10	4	20	15	5	5	5	10	0	14	21	0	12	12	7	20				
16	4	3	3	1	4	4	4	2	2	1	6	2	4	4	1	4	4	5	5	2	2	6	2	6	3	0				
17	8	0	9	4	3	1	3	13	0	8	4	11	3	8	13	1	9	13	1	2	7	11	0	7	10	12				
18	19	35	22	11	20	34	25	13	30	4	7	11	1	16	16	25	27	4	2	31	21	14	19	9	22	22				
19	7	4	8	7	5	6	8	1	8	3	8	1	5	4	1	10	5	2	7	0	1	6	7	10	10	3				
20	17	32	1	23	26	6	2	21	2	22	33	11	19	3	13	10	34	13	17	28	31	6	20	29	13	34				
21	7	6	3	10	12	9	10	2	3	1	5	8	5	1	11	0	7	11	12	2	0	3	11	8	0	9				
22	32	1	42	57	51	56	33	31	44	22	23	12	49	17	4	58	61	42	53	45	12	25	32	60	0	4				
23	17	23	12	18	19	31	29	1	26	3	12	17	0	6	28	16	10	21	32	5	2	19	9	0	19	3				
24	19	21	29	36	9	9	7	30	22	2	10	19	7	0	28	35	35	30	5	31	17	10	9	10	25	28				
25	10	12	14	12	6	0	14	14	13	11	11	5	11	15	2	8	1	16	16	6	2	17	10	4	14	8				
26	9	13	5	0	16	7	5	7	14	16	0	14	5	13	13	11	0	1	1	7	12	18	4	12	16	8				
27	8	10	8	14	7	9	1	0	6	4	2	9	0	10	4	5	0	3	6	6	0	5	10	6	1	9				
28	13	11	19	14	5	16	15	13	24	5	5	11	1	4	10	15	18	23	19	18	5	7	9	3	14	5				
29	47	68	6	53	92	1	84	92	72	66	75	83	55	91	37	0	2	71	34	24	25	66	88	1	88	10				
30	19	10	35	1	25	10	27	20	5	17	5	9	36	22	27	12	29	11	15	0	32	12	11	35	13	4				
31	17	30	17	15	28	16	26	4	7	2	0	23	10	3	9	11	16	19	28	16	33	30	33	27	34	17				
32	11	6	4	19	13	0	9	1	19	1	3	10	8	11	5	7	19	14	3	2	0	6	7	2	18	8				
33	19	15	22	34	13	16	28	32	7	32	10	28	7	18	27	16	10	22	16	1	29	25	35	30	4	16				
34	7	10	6	7	10	10	6	13	11	0	12	11	13	9	8	4	12	14	6	0	7	6	11	4	5	6				
35	9	2	17	7	11	0	9	16	6	3	7	5	0	1	7	13	12	18	7	3	13	8	17	18	14	10				

Clientes ou centros de distribuição regionais

Tabela A.4 - Previsão da demanda dos clientes por período, continuação. (m³)

	Períodos (semanas)																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
36	10	1	2	14	20	13	11	6	8	3	18	14	19	6	7	2	19	5	17	6	1	19	9	12	10	2
37	3	3	1	1	0	2	4	3	4	4	2	3	6	2	0	1	6	6	5	0	4	5	5	6	0	3
38	4	6	2	0	1	3	0	3	6	0	2	5	6	1	2	1	1	0	2	4	4	6	5	5	6	6
39	3	4	4	6	4	2	0	0	2	2	6	0	6	3	2	1	1	0	2	3	4	0	0	0	0	5
40	30	45	3	13	41	56	27	6	1	35	12	2	17	31	33	47	56	27	23	42	8	25	0	12	54	11
41	6	2	4	8	2	11	8	7	12	6	8	9	9	10	6	7	8	4	9	9	6	10	10	6	3	12
42	11	4	11	18	19	10	13	12	12	4	17	0	14	20	8	18	18	3	9	2	19	2	8	16	11	4
43	6	0	5	12	0	11	9	1	6	8	7	10	7	5	9	5	1	5	1	4	9	7	9	7	8	9
44	3	4	4	3	0	3	6	0	5	2	4	1	2	6	6	4	0	0	6	5	0	0	1	3	2	2
45	11	12	14	1	4	6	18	16	15	6	11	8	0	16	22	11	1	0	12	14	6	17	16	14	13	7
46	5	3	0	5	5	7	4	6	8	3	7	4	3	7	1	0	0	1	8	1	3	3	4	5	1	4
47	131	69	170	162	66	62	250	83	111	54	86	175	83	60	103	195	72	258	126	114	172	8	85	24	148	120
48	29	48	11	5	31	3	29	44	22	46	43	44	34	17	19	37	0	33	0	50	29	51	30	33	1	28
49	20	28	36	14	9	10	17	35	29	28	28	1	4	12	25	1	2	25	3	6	4	8	34	10	18	18
50	15	14	2	19	13	28	15	27	5	16	19	19	17	4	8	2	13	14	22	20	5	14	18	28	19	3
51	9	9	2	9	13	7	1	3	10	9	8	3	2	2	16	6	15	3	7	8	2	8	12	10	6	6
52	17	6	7	5	28	25	28	22	6	25	29	2	25	4	19	15	32	33	23	29	2	13	8	12	13	26
53	10	18	17	5	12	2	10	8	5	14	5	12	11	4	13	3	12	6	12	5	8	18	2	12	4	11
54	48	6	50	12	72	69	62	73	69	58	58	84	21	27	40	33	0	63	74	71	8	26	75	30	25	11
55	25	27	33	4	31	10	1	41	11	2	21	1	42	4	40	10	22	12	10	5	27	13	8	34	48	16
56	15	2	19	4	0	5	16	10	0	6	24	26	16	13	16	11	29	19	12	28	21	28	0	6	7	11
57	12	16	22	19	8	8	10	12	2	1	3	24	13	20	1	12	9	12	12	6	4	0	19	14	12	2
58	10	4	5	7	5	11	7	6	0	6	3	10	9	14	1	10	7	7	6	13	3	14	9	5	7	12
59	59	97	7	96	3	112	84	48	105	50	81	46	56	89	17	77	87	101	110	16	70	83	50	63	77	20
60	10	17	16	4	2	11	9	4	1	10	13	13	16	15	0	16	12	10	13	1	2	18	5	11	18	9
61	13	5	18	11	4	23	2	6	4	24	16	1	10	2	3	16	19	10	12	6	24	5	3	13	14	21
62	11	18	0	12	11	13	12	16	16	6	15	1	20	20	10	8	1	16	5	0	15	19	0	19	6	20
63	10	12	6	9	4	16	9	13	5	14	3	20	19	1	1	17	17	4	15	9	1	10	4	2	18	11
64	5	1	4	6	0	4	6	3	3	1	0	7	2	8	0	1	4	5	1	4	0	7	6	6	4	6
65	6	7	11	4	11	7	3	7	6	9	11	12	8	8	11	11	9	8	8	10	0	8	6	7	9	8
66	7	9	5	0	6	9	12	6	8	10	11	11	10	12	2	12	10	8	3	12	6	1	6	9	0	3
67	3	4	4	3	6	2	2	2	0	0	2	0	3	5	2	2	1	0	1	3	1	6	5	0	1	1
68	11	6	10	3	17	11	11	15	14	15	4	5	6	14	12	18	13	16	15	7	19	18	20	0	2	9
69	7	5	7	1	2	12	12	3	10	7	0	8	3	10	2	10	0	10	5	11	7	3	1	9	12	8
70	9	1	1	4	16	13	11	7	2	2	12	11	1	1	9	13	3	9	7	1	10	3	12	10	0	12

Clientes ou centros de distribuição regionais

Tabela A.5 - Custos de transporte com embarques FTL para o CD1 (u.m.)

Tipo de veículo FTL											
CL	1	2	3	4	5	CL	1	2	3	4	5
1	19480,0	14791,1	14791,1	14791,1	14791,1	36	5269,2	4042,2	3436,6	3436,6	2921,6
2	11300,0	9491,4	8068,6	8068,6	6858,4	37	5269,2	4042,2	3436,6	3436,6	2921,6
3	11300,0	8767,9	7453,5	7453,5	6336,1	38	5269,2	4042,2	3436,6	3436,6	2921,6
4	11300,0	8767,9	7453,5	7453,5	6336,1	39	5269,2	4042,2	3436,6	3436,6	2921,6
5	13900,0	8767,9	7453,5	7453,5	6336,1	40	4861,6	3685,1	3133,3	3133,3	2663,5
6	13900,0	8767,9	7453,5	7453,5	6336,1	41	4861,6	3685,1	3133,3	3133,3	2663,5
7	15300,0	11357,7	9654,7	9654,7	8206,5	42	6820,5	5040,6	4285,5	4285,5	3643,0
8	15300,0	11357,7	9654,7	9654,7	8206,5	43	6820,5	5040,6	4285,5	4285,5	3643,0
9	6679,4	5017,4	4265,5	4265,5	3626,2	44	6820,5	5040,6	4285,5	4285,5	3643,0
10	6679,4	5017,4	4265,5	4265,5	3626,2	45	6820,5	5040,6	4285,5	4285,5	3643,0
11	5488,2	3897,9	3313,4	3313,4	2817,3	46	6820,5	5040,6	4285,5	4285,5	3643,0
12	6820,5	4366,6	3712,5	3712,5	3156,4	47	1621,9	1130,1	961,6	961,6	818,3
13	6542,5	4913,2	4177,0	4177,0	3551,4	48	1621,9	1130,1	961,6	961,6	818,3
14	17446,3	12911,2	10975,4	10975,4	9329,2	49	1621,9	1130,1	961,6	961,6	818,3
15	8831,1	6718,4	5711,5	5711,5	4855,3	50	1621,9	1130,1	961,6	961,6	818,3
16	13033,4	9993,8	8495,1	8495,1	7221,8	51	1621,9	1130,1	961,6	961,6	818,3
17	14200,0	11150,2	9477,7	9477,7	8057,0	52	1621,9	1130,1	961,6	961,6	818,3
18	13900,0	10839,5	9214,4	9214,4	7832,6	53	1621,9	1130,1	961,6	961,6	818,3
19	15200,0	11875,9	10094,9	10094,9	8581,5	54	4555,1	2916,3	2479,2	2479,2	2108,5
20	3599,8	2306,5	1961,1	1961,1	1667,2	55	4555,1	2916,3	2479,2	2479,2	2108,5
21	14993,4	11357,7	9654,7	9654,7	8206,5	56	4555,1	2916,3	2479,2	2479,2	2108,5
22	6133,8	4111,7	3495,6	3495,6	2972,1	57	4555,1	2916,3	2479,2	2479,2	2108,5
23	6916,4	5089,1	4326,5	4326,5	3677,8	58	4555,1	2916,3	2479,2	2479,2	2108,5
24	4000,1	3045,9	2589,8	2589,8	2202,2	59	4555,1	2916,3	2479,2	2479,2	2108,5
25	5354,5	3710,4	3154,3	3154,3	2681,4	60	4555,1	2916,3	2479,2	2479,2	2108,5
26	5354,5	3710,4	3154,3	3154,3	2681,4	61	4555,1	2916,3	2479,2	2479,2	2108,5
27	11300,0	8553,6	7271,1	7271,1	6180,7	62	4555,1	2916,3	2479,2	2479,2	2108,5
28	5269,2	4042,2	3436,6	3436,6	2921,6	63	4555,1	2916,3	2479,2	2479,2	2108,5
29	5269,2	4042,2	3436,6	3436,6	2921,6	64	4555,1	2916,3	2479,2	2479,2	2108,5
30	3990,6	3254,4	2766,8	2766,8	2351,8	65	4555,1	2916,3	2479,2	2479,2	2108,5
31	3990,6	3254,4	2766,8	2766,8	2351,8	66	4555,1	2916,3	2479,2	2479,2	2108,5
32	3990,6	3254,4	2766,8	2766,8	2351,8	67	4555,1	2916,3	2479,2	2479,2	2108,5
33	3990,6	3254,4	2766,8	2766,8	2351,8	68	9476,7	7222,8	6140,2	6140,2	5219,7
34	3990,6	3254,4	2766,8	2766,8	2351,8	69	14000,0	11107,0	9441,9	9441,9	8026,4
35	3990,6	3254,4	2766,8	2766,8	2351,8	70	21800,0	18841,7	16016,0	16016,0	13613,7

Tabela A.6 - Custos de transporte com embarques FTL para o CD2 (u.m.)

Tipos de veículos FTL											
CL	1	2	3	4	5	CL	1	2	3	4	5
1	8831.1	6718.4	5711.5	5711.5	4855.3	36	1621.9	1130.1	961.6	961.6	818.3
2	4555.1	2916.3	2479.2	2479.2	2108.5	37	4000.1	3045.9	2589.8	2589.8	2202.2
3	3990.6	3254.4	2766.8	2766.8	2351.8	38	4555.1	2916.3	2479.2	2479.2	2108.5
4	5354.5	3710.4	3154.3	3154.3	2681.4	39	4555.1	2916.3	2479.2	2479.2	2108.5
5	6916.4	5089.1	4326.5	4326.5	3677.8	40	4555.1	2916.3	2479.2	2479.2	2108.5
6	6133.8	4111.7	3495.6	3495.6	2972.1	41	1621.9	1130.1	961.6	961.6	818.3
7	4555.1	2916.3	2479.2	2479.2	2108.5	42	13900.0	10839.5	9214.4	9214.4	7832.6
8	17446.3	12911.2	10975.4	10975.4	9329.2	43	11300.0	9491.4	8068.6	8068.6	6858.4
9	15300.0	11357.7	9654.7	9654.7	8206.5	44	4555.1	2916.3	2479.2	2479.2	2108.5
10	6820.5	5040.6	4285.5	4285.5	3643.0	45	13900.0	8767.9	7453.5	7453.5	6336.1
11	6820.5	5040.6	4285.5	4285.5	3643.0	46	3990.6	3254.4	2766.8	2766.8	2351.8
12	6820.5	5040.6	4285.5	4285.5	3643.0	47	15200.0	11875.9	10094.9	10094.9	8581.5
13	6679.4	5017.4	4265.5	4265.5	3626.2	48	1621.9	1130.1	961.6	961.6	818.3
14	3599.8	2306.5	1961.1	1961.1	1667.2	49	14000.0	11107.0	9441.9	9441.9	8026.4
15	14993.4	11357.7	9654.7	9654.7	8206.5	50	1621.9	1130.1	961.6	961.6	818.3
16	5354.5	3710.4	3154.3	3154.3	2681.4	51	11300.0	8767.9	7453.5	7453.5	6336.1
17	4861.6	3685.1	3133.3	3133.3	2663.5	52	15300.0	11357.7	9654.7	9654.7	8206.5
18	3990.6	3254.4	2766.8	2766.8	2351.8	53	1621.9	1130.1	961.6	961.6	818.3
19	4555.1	2916.3	2479.2	2479.2	2108.5	54	11300.0	8767.9	7453.5	7453.5	6336.1
20	1621.9	1130.1	961.6	961.6	818.3	55	5269.2	4042.2	3436.6	3436.6	2921.6
21	4555.1	2916.3	2479.2	2479.2	2108.5	56	21800.0	18841.7	16016.0	16016.0	13613.7
22	13033.4	9993.8	8495.1	8495.1	7221.8	57	4555.1	2916.3	2479.2	2479.2	2108.5
23	5269.2	4042.2	3436.6	3436.6	2921.6	58	4555.1	2916.3	2479.2	2479.2	2108.5
24	13900.0	8767.9	7453.5	7453.5	6336.1	59	6542.5	4913.2	4177.0	4177.0	3551.4
25	4861.6	3685.1	3133.3	3133.3	2663.5	60	6820.5	5040.6	4285.5	4285.5	3643.0
26	3990.6	3254.4	2766.8	2766.8	2351.8	61	4555.1	2916.3	2479.2	2479.2	2108.5
27	5269.2	4042.2	3436.6	3436.6	2921.6	62	4555.1	2916.3	2479.2	2479.2	2108.5
28	5269.2	4042.2	3436.6	3436.6	2921.6	63	9476.7	7222.8	6140.2	6140.2	5219.7
29	5488.2	3897.9	3313.4	3313.4	2817.3	64	6820.5	5040.6	4285.5	4285.5	3643.0
30	3990.6	3254.4	2766.8	2766.8	2351.8	65	19480.0	14791.1	14791.1	14791.1	14791.1
31	11300.0	8553.6	7271.1	7271.1	6180.7	66	1621.9	1130.1	961.6	961.6	818.3
32	4555.1	2916.3	2479.2	2479.2	2108.5	67	3990.6	3254.4	2766.8	2766.8	2351.8
33	6820.5	4366.6	3712.5	3712.5	3156.4	68	14200.0	11150.2	9477.7	9477.7	8057.0
34	5269.2	4042.2	3436.6	3436.6	2921.6	69	5269.2	4042.2	3436.6	3436.6	2921.6
35	4555.1	2916.3	2479.2	2479.2	2108.5	70	6679.4	5017.4	4265.5	4265.5	3626.2

Tabela A.7 - Custos de transporte com embarques LTL para o CD1(u.m.)

Faixas de descontos LTL							
CL	1 [<10 m ³]	2 [<30 m ³]	3 [≥30 m ³]	CL	1 [<10 m ³]	2 [<30 m ³]	3 [≥30 m ³]
1	210.6	197.4	184.2	36	210.6	197.4	184.2
2	141.9	134.3	126.7	37	141.9	134.3	126.7
3	130.2	122.5	114.7	38	130.2	122.5	114.7
4	130.2	122.5	114.7	39	130.2	122.5	114.7
5	255.0	243.5	232.1	40	255.0	243.5	232.1
6	255.0	243.5	232.1	41	255.0	243.5	232.1
7	193.9	184.4	174.9	42	193.9	184.4	174.9
8	193.9	184.4	174.9	43	193.9	184.4	174.9
9	137.9	130.8	123.7	44	137.9	130.8	123.7
10	137.9	130.8	123.7	45	137.9	130.8	123.7
11	136.0	126.9	117.8	46	136.0	126.9	117.8
12	178.0	167.5	157.0	47	178.0	167.5	157.0
13	126.4	119.0	111.7	48	126.4	119.0	111.7
14	299.0	286.6	274.2	49	299.0	286.6	274.2
15	152.9	142.9	132.9	50	152.9	142.9	132.9
16	229.6	215.9	202.3	51	229.6	215.9	202.3
17	193.9	184.4	174.9	52	193.9	184.4	174.9
18	174.8	165.8	156.8	53	174.8	165.8	156.8
19	206.6	196.8	186.9	54	206.6	196.8	186.9
20	85.2	77.5	69.7	55	85.2	77.5	69.7
21	229.2	218.6	208.0	56	229.2	218.6	208.0
22	119.7	111.3	102.8	57	119.7	111.3	102.8
23	133.9	124.4	114.9	58	133.9	124.4	114.9
24	100.0	92.4	84.7	59	100.0	92.4	84.7
25	119.7	111.3	102.8	60	119.7	111.3	102.8
26	119.7	111.3	102.8	61	119.7	111.3	102.8
27	136.8	128.8	120.7	62	136.8	128.8	120.7
28	91.0	83.3	75.7	63	91.0	83.3	75.7
29	91.0	83.3	75.7	64	91.0	83.3	75.7
30	73.9	67.3	60.6	65	73.9	67.3	60.6
31	73.9	67.3	60.6	66	73.9	67.3	60.6
32	73.9	67.3	60.6	67	73.9	67.3	60.6
33	73.9	67.3	60.6	68	73.9	67.3	60.6
34	73.9	67.3	60.6	69	73.9	67.3	60.6
35	73.9	67.3	60.6	70	73.9	67.3	60.6

Tabela A.8 - Custos de transporte com embarques LTL para o CD2 (u.m.)

Faixas de descontos LTL							
CL	1 [<10 m ³]	2 [<30 m ³]	3 [≥30 m ³]	CL	1 [<10 m ³]	2 [<30 m ³]	3 [≥30 m ³]
1	152.9	142.9	132.9	36	56.4	51.0	45.5
2	84.2	76.9	69.7	37	100.0	92.4	84.7
3	73.9	67.3	60.6	38	84.2	76.9	69.7
4	119.7	111.3	102.8	39	84.2	76.9	69.7
5	133.9	124.4	114.9	40	84.2	76.9	69.7
6	119.7	111.3	102.8	41	56.4	51.0	45.5
7	84.2	76.9	69.7	42	174.8	165.8	156.8
8	299.0	286.6	274.2	43	141.9	134.3	126.7
9	193.9	184.4	174.9	44	84.2	76.9	69.7
10	157.0	146.5	136.0	45	255.0	243.5	232.1
11	157.0	146.5	136.0	46	73.9	67.3	60.6
12	157.0	146.5	136.0	47	206.6	196.8	186.9
13	137.9	130.8	123.7	48	56.4	51.0	45.5
14	85.2	77.5	69.7	49	195.4	183.7	172.1
15	229.2	218.6	208.0	50	56.4	51.0	45.5
16	119.7	111.3	102.8	51	130.2	122.5	114.7
17	116.5	108.2	99.8	52	193.9	184.4	174.9
18	73.9	67.3	60.6	53	56.4	51.0	45.5
19	84.2	76.9	69.7	54	130.2	122.5	114.7
20	56.4	51.0	45.5	55	91.0	83.3	75.7
21	84.2	76.9	69.7	56	300.7	284.6	268.5
22	229.6	215.9	202.3	57	84.2	76.9	69.7
23	91.0	83.3	75.7	58	84.2	76.9	69.7
24	255.0	243.5	232.1	59	126.4	119.0	111.7
25	116.5	108.2	99.8	60	157.0	146.5	136.0
26	73.9	67.3	60.6	61	84.2	76.9	69.7
27	91.0	83.3	75.7	62	84.2	76.9	69.7
28	91.0	83.3	75.7	63	212.3	199.7	187.2
29	136.0	126.9	117.8	64	157.0	146.5	136.0
30	73.9	67.3	60.6	65	210.6	197.4	184.2
31	136.8	128.8	120.7	66	56.4	51.0	45.5
32	84.2	76.9	69.7	67	73.9	67.3	60.6
33	178.0	167.5	157.0	68	193.9	184.4	174.9
34	91.0	83.3	75.7	69	91.0	83.3	75.7
35	84.2	76.9	69.7	70	137.9	130.8	123.7

Tabela A.9 - Custos de transporte com embarques FTL para o CD1

Tipo de veículo FTL											
CL	1	2	3	4	5	CL	1	2	3	4	5
1	-	-	-	1	1	36	1	1	1	1	1
2	-	-	-	1	1	37	1	1	1	1	1
3	-	-	-	1	1	38	1	1	1	1	1
4	-	-	-	1	1	39	1	1	1	1	1
5	-	-	-	1	1	40	-	-	-	1	1
6	-	-	-	1	1	41	-	-	-	1	1
7	1	1	1	1	1	42	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	43	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	44	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	45	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	46	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	47	-	-	-	1	1
13	1	1	1	1	1	48	-	-	-	1	1
14	1	1	1	1	1	49	-	-	-	1	1
15	1	1	1	1	1	50	-	-	-	1	1
16	1	1	1	1	1	51	-	-	-	1	1
17	1	1	1	1	1	52	-	-	-	1	1
18	1	1	1	1	1	53	-	-	-	1	1
19	1	1	1	1	1	54	-	-	-	1	1
20	-	-	-	1	1	55	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	56	1	1	1	1	1
22	-	-	-	1	1	57	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	58	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1	59	-	-	-	1	1
25	1	1	1	1	1	60	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1	61	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1	62	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1	63	1	1	1	1	1
29	-	-	-	1	1	64	1	1	1	1	1
30	-	-	-	1	1	65	1	1	1	1	1
31	-	-	-	1	1	66	1	1	1	1	1
32	-	-	-	1	1	67	1	1	1	1	1
33	-	-	-	1	1	68	1	1	1	1	1
34	-	-	-	1	1	69	1	1	1	1	1
35	-	-	-	1	1	70	1	1	1	1	1

Tabela A.10 - Custos de transporte com embarques FTL para o CD2

Tipo de veículo FTL											
CL	1	2	3	4	5	CL	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1	36	-	-	-	1	1
2	1	1	1	1	1	37	1	1	1	1	1
3	-	-	-	1	1	38	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	39	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	40	1	1	1	1	1
6	-	-	-	1	1	41	-	-	-	1	1
7	-	-	-	1	1	42	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	43	-	-	-	1	1
9	1	1	1	1	1	44	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	45	-	-	-	1	1
11	1	1	1	1	1	46	-	-	-	1	1
12	1	1	1	1	1	47	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	48	-	-	-	1	1
14	-	-	-	1	1	49	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	50	-	-	-	1	1
16	1	1	1	1	1	51	-	1	1	1	1
17	-	-	-	1	1	52	1	1	1	1	1
18	-	-	-	1	1	53	-	-	-	1	1
19	1	1	1	1	1	54	-	-	-	1	1
20	-	-	-	1	1	55	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	56	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	57	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	58	1	1	1	1	1
24	-	-	-	1	1	59	1	1	1	1	1
25	-	-	-	1	1	60	1	1	1	1	1
26	-	-	-	1	1	61	1	1	1	1	1
27	-	-	-	1	1	62	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1	63	1	1	1	1	1
29	1	1	1	1	1	64	1	1	1	1	1
30	-	-	-	1	1	65	-	-	-	1	1
31	1	1	1	1	1	66	-	-	-	1	1
32	-	-	-	1	1	67	-	-	-	1	1
33	1	1	1	1	1	68	1	1	1	1	1
34	1	1	1	1	1	69	1	1	1	1	1
35	1	1	1	1	1	70	1	1	1	1	1

Tabela A.11 - custos de manter estoque por clientes (u.m/m³)

Clientes ou centros de distribuição regionais													
1	140.2	11	135.2	21	188.8	31	72.9	41	106.5	51	52.4	61	58.3
2	153.2	12	71.8	22	127.2	32	73.1	42	113.9	52	26.9	62	50.0
3	79.6	13	114.7	23	83.0	33	83.2	43	75.4	53	60.0	63	70.1
4	93.2	14	162.5	24	83.0	34	71.3	44	77.9	54	27.8	64	64.0
5	162.0	15	273.8	25	117.1	35	78.5	45	77.9	55	57.3	65	77.6
6	193.9	16	187.8	26	64.1	36	73.6	46	84.9	56	57.4	66	64.0
7	150.1	17	176.2	27	107.9	37	99.9	47	19.5	57	84.5	67	56.1
8	118.5	18	196.5	28	71.9	38	70.2	48	38.6	58	56.7	68	210.1
9	141.3	19	179.6	29	95.4	39	102.2	49	40.7	59	25.2	69	219.1
10	169.8	20	100.5	30	65.8	40	93.7	50	45.4	60	45.2	70	307.6

Tabela A.12 - custos de manter estoque em trânsito por clientes (u.m/(m³xdia)).

Clientes ou centros de distribuição regionais													
1	17.4	11	27.5	21	27.6	31	23.5	41	30.8	51	17.8	61	19.5
2	30.5	12	16.6	22	29.5	32	20.9	42	35	52	11.8	62	16.8
3	24.5	13	24	23	30	33	23.4	43	24.2	53	19.5	63	17.1
4	27.2	14	30.1	24	20	34	21.6	44	26	54	7.7	64	17.5
5	31.2	15	32.6	25	30.8	35	24.7	45	15	55	17.9	65	19.8
6	31.5	16	28.2	26	23.2	36	25.9	46	25.7	56	17.4	66	17.2
7	26.8	17	27.9	27	23.4	37	29	47	8.6	57	20.7	67	18.8
8	23.1	18	31.2	28	24.4	38	23.4	48	15.7	58	17.4	68	46.2
9	34.6	19	32.4	29	26.4	39	27.3	49	15.1	59	8.7	69	31.9
10	35.9	20	29.1	30	25.7	40	27.5	50	18.2	60	16.9	70	41

Tabela A.13 - Inventario inicial para os clientes (m³). valor simulado

Clientes ou centros de distribuição regionais													
1	16.00	11	-	21	6.00	31	-	41	7.00	51	14.00	61	17.00
2	-	12	-	22	-	32	-	42	-	52	15.00	62	-
3	-	13	-	23	-	33	-	43	-	53	-	63	12.00
4	16.00	14	15.00	24	13.00	34	9.00	44	9.00	54	-	64	7.00
5	19.00	15	-	25	-	35	-	45	-	55	-	65	-
6	-	16	6.00	26	-	36	-	46	-	56	-	66	-
7	29.00	17	10.00	27	-	37	-	47	-	57	-	67	-
8	10.00	18	23.00	28	-	38	-	48	-	58	-	68	17.00
9	-	19	8.00	29	-	39	-	49	18.00	59	-	69	10.00
10	-	20	-	30	21.00	40	-	50	-	60	10.00	70	11.00

Tabela A.14 - *Lead time* de atendimento médio para os embarques FTL (dias).

Clientes ou centros de distribuição regionais														
CD 1	1	10.00	11	2.00	21	3.00	31	1.00	41	1.00	51	1.00	61	1.00
	2	2.00	12	2.00	22	2.00	32	1.00	42	1.00	52	1.00	62	1.00
	3	3.00	13	2.00	23	2.00	33	1.00	43	1.00	53	1.00	63	1.00
	4	3.00	14	3.00	24	1.00	34	1.00	44	1.00	54	1.00	64	1.00
	5	3.00	15	2.00	25	2.00	35	1.00	45	1.00	55	1.00	65	1.00
	6	3.00	16	2.00	26	2.00	36	2.00	46	1.00	56	1.00	66	1.00
	7	3.00	17	2.00	27	2.00	37	2.00	47	1.00	57	1.00	67	1.00
	8	3.00	18	7.00	28	2.00	38	2.00	48	1.00	58	1.00	68	2.00
	9	2.00	19	10.00	29	2.00	39	2.00	49	1.00	59	1.00	69	4.00
	10	2.00	20	2.00	30	1.00	40	1.00	50	1.00	60	1.00	70	6.00
CD 2	1	2.00	11	1.00	21	1.00	31	2.00	41	1.00	51	3.00	61	1.00
	2	1.00	12	1.00	22	2.00	32	1.00	42	7.00	52	3.00	62	1.00
	3	1.00	13	2.00	23	2.00	33	2.00	43	2.00	53	1.00	63	2.00
	4	2.00	14	2.00	24	3.00	34	2.00	44	1.00	54	3.00	64	1.00
	5	2.00	15	3.00	25	1.00	35	1.00	45	3.00	55	2.00	65	10.00
	6	2.00	16	2.00	26	1.00	36	1.00	46	1.00	56	6.00	66	1.00
	7	1.00	17	1.00	27	2.00	37	1.00	47	10.00	57	1.00	67	1.00
	8	3.00	18	1.00	28	2.00	38	1.00	48	1.00	58	1.00	68	2.00
	9	3.00	19	1.00	29	2.00	39	1.00	49	4.00	59	2.00	69	2.00
	10	1.00	20	1.00	30	1.00	40	1.00	50	1.00	60	1.00	70	2.00

Tabela A.15 - *Lead time* de atendimento médio para os embarques LTL (dias).

Clientes ou centros de distribuição regionais														
CD 1	1	14.00	11	3.00	21	7.00	31	2.00	41	2.00	51	1.00	61	3.00
	2	6.00	12	5.00	22	4.00	32	2.00	42	2.00	52	1.00	62	3.00
	3	5.00	13	3.00	23	4.00	33	2.00	43	2.00	53	1.00	63	3.00
	4	5.00	14	7.00	24	3.00	34	2.00	44	2.00	54	3.00	64	3.00
	5	5.00	15	5.00	25	4.00	35	2.00	45	2.00	55	3.00	65	3.00
	6	5.00	16	8.00	26	4.00	36	3.00	46	2.00	56	3.00	66	3.00
	7	9.00	17	9.00	27	6.00	37	3.00	47	1.00	57	3.00	67	3.00
	8	9.00	18	8.00	28	3.00	38	3.00	48	1.00	58	3.00	68	6.00
	9	3.00	19	10.00	29	3.00	39	3.00	49	1.00	59	3.00	69	7.00
	10	3.00	20	4.00	30	2.00	40	2.00	50	1.00	60	3.00	70	10.00
CD 2	1	5.00	11	2.00	21	3.00	31	6.00	41	1.00	51	5.00	61	3.00
	2	3.00	12	2.00	22	8.00	32	3.00	42	8.00	52	9.00	62	3.00
	3	2.00	13	2.00	23	3.00	33	5.00	43	6.00	53	1.00	63	6.00
	4	4.00	14	3.00	24	5.00	34	3.00	44	3.00	54	5.00	64	2.00
	5	4.00	15	4.00	25	2.00	35	3.00	45	5.00	55	3.00	65	14.00
	6	4.00	16	7.00	26	2.00	36	1.00	46	2.00	56	10.00	66	1.00
	7	3.00	17	4.00	27	3.00	37	3.00	47	10.00	57	3.00	67	2.00
	8	7.00	18	2.00	28	3.00	38	3.00	48	1.00	58	3.00	68	9.00
	9	9.00	19	2.00	29	3.00	39	3.00	49	7.00	59	3.00	69	3.00
	10	2.00	20	3.00	30	2.00	40	3.00	50	1.00	60	2.00	70	3.00

Os *Lead times* maiores que 7 (sete) dias indicam que as quantidades enviadas para o cliente só estarão disponíveis para o próximo período. Portanto, o parâmetro $RFTL_{ij}$ ou $RFTL_{ij}$ tornasse igual a 0. Considere na Tabela A.14, por exemplo, $RFTL_{1,1} = 0$, $RFTL_{2,47} = 0$ e também na Tabela A.15 $RLTL_{1,17} = 0$.

Tabela A.16 - Demanda diária esperada dos clientes (m³).

Clientes ou centros de distribuição regionais													
1	2.00	11	1.50	21	0.90	31	2.60	41	1.10	51	1.00	61	1.60
2	1.10	12	0.90	22	4.80	32	1.10	42	1.60	52	2.50	62	1.60
3	3.00	13	2.20	23	2.10	33	2.80	43	0.90	53	1.30	63	1.40
4	2.40	14	1.30	24	2.70	34	1.10	44	0.40	54	6.40	64	0.50
5	2.80	15	1.70	25	1.40	35	1.30	45	1.50	55	2.70	65	1.10
6	1.00	16	0.50	26	1.20	36	1.40	46	0.50	56	1.90	66	1.00
7	2.90	17	0.90	27	0.80	37	0.40	47	16.40	57	1.50	67	0.30
8	1.00	18	2.50	28	1.70	38	0.40	48	3.90	58	1.00	68	1.60
9	1.00	19	0.80	29	7.30	39	0.30	49	2.30	59	9.40	69	0.90
10	1.10	20	2.60	30	2.40	40	3.60	50	2.10	60	1.40	70	1.00

A organização também forneceu as seguintes estimativas:

- O desvio padrão da demanda diária é considerado como $\pm 50\%$ da média da demanda diária para cada cliente. Como definido na expressão:

$$\sigma Dd_j = \pm 0.5 \times \overline{Dd}_j \quad (A.1)$$

- O desvio padrão do *lead time* para embarques FTL é considerado como $\pm 10\%$ da média do *lead time* FTL desde cada CD *i* para cada cliente *j*. Como definido na expressão:

$$LTFTL_{ij} = \pm 0.1 \times \overline{LTFTL}_{ij} \quad (A.2)$$

- O desvio padrão do *lead time* para embarques LTL é considerado como $\pm 40\%$ da média do *lead time* LTL desde cada CD *i* para cada cliente *j*. Como definido na expressão:

$$LTLTL_{ij} = \pm 0.4 \times \overline{LTLTL}_{ij} \quad (A.3)$$

- A quantidade máxima permitida para transportar em cada período é de 800 m³ para o CD1 e 500 m³ para o CD 2.

Observa-se que embarques fracionados (LTL) fornecem *lead time* de atendimentos mais variáveis, em comparação com os embarques dedicados (FTL).

B - Curvas de Utilidade para Critérios Quantitativos e as funções

A Figura B.1 apresenta a curva de utilidade para o Custo de manutenção de estoque. A Tabela B.1 apresenta os valores de custo e a sua utilidade equivalente. Apresenta-se também a função aproximada para a utilidade do critério em função do seu indicador. Valores de custos de estoque inferiores a R\$ 1.500.000 tem utilidades iguais a cem (100) e valores de custo maiores a R\$3.400.000 tem utilidades iguais a zero (0).

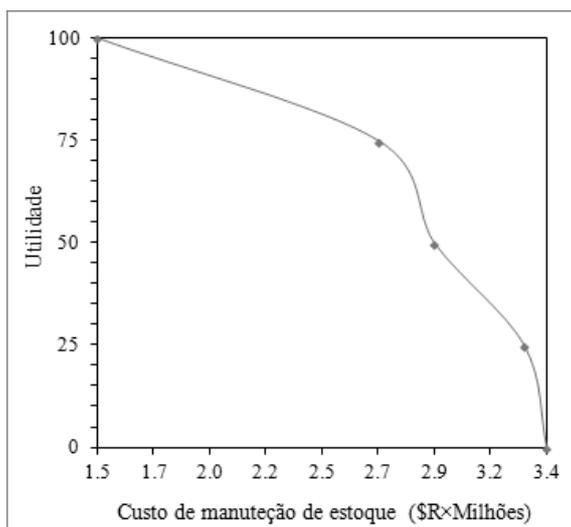


Figura B.1 – Função de utilidade do critério: Custo manutenção de estoque

Tabela B.1 - Utilidade para os custos de manutenção de estoque

Utilidade $f(x)$	Valor de Custo (x)
0	$x \geq \text{R\$ } 3.400.000$
25	R\$ 3.305.000
50	R\$ 2.925.000
75	R\$ 2.687.500
100	$x \leq \text{R\$ } 1.500.000$

Função aproximada ($0 \leq f(x) \leq 100$)

$$f(x) = \begin{cases} -2 \times 10^{-5}x + 131,58 & x \leq 2.687.500 \\ 6 \times 10^{-11}x^2 - 5 \times 10^{-4}x + 860,4 & x \leq 3.305.000 \\ -3 \times 10^{-4}x + 894,74 & x > 3.305.000 \end{cases}$$

A Figura B.2 apresenta a curva de utilidade para o Custo de estoque em trânsito. A Tabela B.2 apresenta os valores de custo e a sua utilidade equivalente. Apresenta-se também a função aproximada para a utilidade do critério em função do seu indicador.

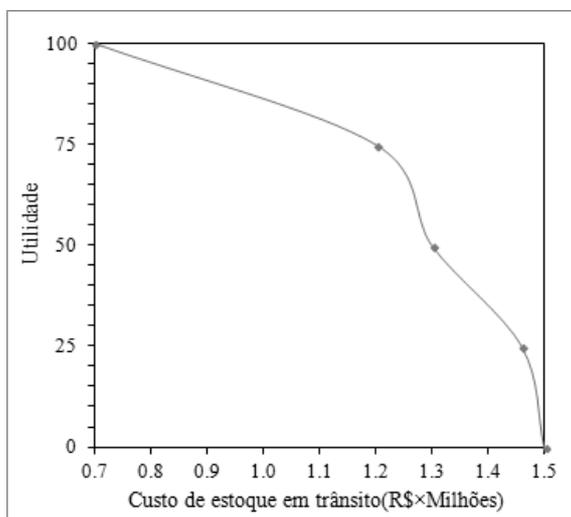


Figura B.2 – Função de utilidade: C. Est. trânsito.

Tabela B.2 - Utilidade para os valores de estoque em trânsito

Utilidade $f(x)$	Valor de Custo (x)
0	$\geq \text{R\$ } 1.500.000$
25	R\$ 1.461.500
50	R\$ 1.307.500
75	R\$ 1.211.250
100	$\leq \text{R\$ } 730.000$

Função aproximada ($0 \leq f(x) \leq 100$)

$$f(x) = \begin{cases} -5 \times 10^{-5}x + 137,92 & x \leq 1.211.250 \\ 4 \times 10^{-10}x^2 - 1,3 \times 10^{-3}x + 1068 & x \leq 1.480.750 \\ -1,3 \times 10^{-3}x + 1948,1 & x > 1.480.750 \end{cases}$$

A Figura B.3 apresenta a curva de utilidade para a Confiabilidade do tempo em trânsito. A Tabela B.3 apresenta os valores de desvio do *lead time* da rede e a sua utilidade equivalente. Apresenta-se também a função aproximada para a utilidade do critério em função do seu indicador.

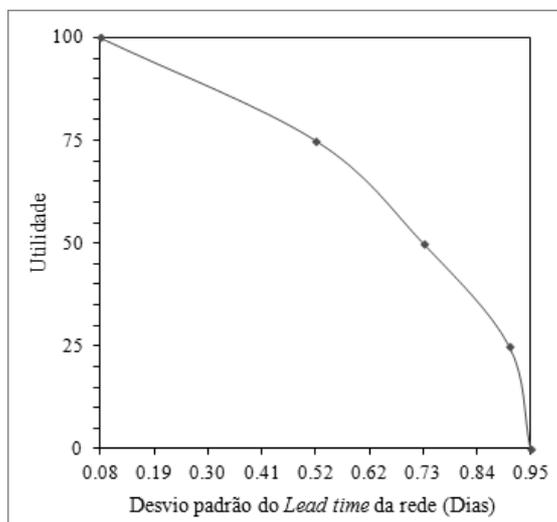


Figura B.3 – Função de utilidade do critério:
Confiabilidade do tempo em trânsito

Tabela B.3 - Utilidade para o desvio padrão do *lead time* da rede de distribuição

Utilidade $f(x)$	Desvio padrão do <i>Lead time</i> médio da rede (x)
0	$\geq 0,95$ dias
25	0,91 dias
50	0,73 dias
75	0,52 dias
100	$\leq 0,08$ dias

Função aproximada ($0 \leq f(x) \leq 100$)

$$f(x) = -276,96x^3 + 315,07x^2 - 161,05x + 111,1$$

C - Julgamentos individuais dos tomadores de decisões

Neste anexo apresentam-se, de forma individual, os julgamentos feitos pelos três respondentes (DM1, DM2 e DM3). Considera-se a escala AHP para definir a preferência entre cada par de critérios.

Julgamentos do decisor DM1

A Tabela C.1 apresenta o julgamento do primeiro respondente e decisor (DM1) entre os critérios Custo e Benefício. Para o problema específico, o decisor considera que Custo é duas vezes mais importante que Benefício. Através do método AHP os julgamentos são transformados em porcentagem, representando o Custo 66,67% da decisão e o Benefício o 33,33% restante. A Tabela C.1 também apresenta o índice de inconsistência do julgamento, sendo para este caso zero (0) devido a que uma única comparação foi necessária.

Tabela C.1 - Julgamentos para os critérios gerais, DM1

Crítérios	Benefício	Pesos
Custo	2	0,667
Benefício		0,333
Ind. Inconsistência: 0,00		

Tabela C.2 - Julgamentos para os critérios de Custo, DM1

Crítérios	C. Estoque	C. Est. Trânsito	Pesos
C. Transporte	1/2	4	0,345
C. Estoque		4	0,547
C. Est. Trânsito			0,109
Ind. Inconsistência: 0,05			

Tabela C.3 - Julgamentos para os critérios de Benefício, DM1

Crítérios	Segurança	Atendimento	Personalização	Manipulação	Pesos
Eficiência	2	1/3	3	4	0,233
Segurança		1/4	2	2	0,132
Atendimento			5	5	0,485
Personalização				1	0,077
Manipulação					0,073
Ind. Inconsistência: 0,02					

Tabela C.4 - Julgamentos para os critérios de Eficiência operacional, DM1

Subcritérios	Confiabilidade	Coleta confiável	Erro de entrega	Frequência	Pesos
Velocidade	3	3	5	9	0,445
Confiabilidade		5	4	8	0,310
Coleta confiável			3	7	0,142
Erro de entrega				4	0,074
Frequência					0,029
Ind. Inconsistência: 0,10					

Tabela C.5 - Julgamentos para os critérios de Segurança na prestação de serviços, DM1

Subcritérios	Histórico	Resp.	Cobertura/ acesso	Docum.	Pesos
Perda e dano	1/5	1/3	1/3	1	0,085
Histórico		3	4	1	0,396
Resposta rapida			2	1	0,193
Cobertura/acesso				1	0,143
Documentação					0,184
Ind. Inconsistência: 0,10					

Tabela C.6 - Julgamentos para os critérios de Atendimento ao cliente, DM1

Subcritérios	Cooperação	Comunicação	T.I.	Pesos
Qualidade pessoal	2	3	1/3	0,240
Cooperação		2	1/3	0,152
Comunicação			1/5	0,085
T.I.				0,523
Ind. Inconsistência: 0,02				

Tabela C.7 - Julgamentos para os critérios de fator de manipulação e manuseio, DM1

Subcritérios	Prog. Flexíveis	Capacid.	Op. Carga/descarga	Rastr.	Pesos
Mudanças	1/4	1/2	1/3	1/5	0,058
Prog. Flexíveis		2	2	1/3	0,215
Capacidade			3	1/2	0,177
Op. carga/descarga				1/9	0,088
Rastreamento					0,433
Ind. Inconsistência: 0,06					

Tabela C.8 - Julgamentos para os critérios de Fator de personalização, DM1

Subcritérios	Relacionamento LP	Taxas flexíveis	Pesos
Compatibilidade	2	1/3	0,249
Relacionamento LP		1/3	0,157
Taxas flexíveis			0,594
Ind. Inconsistencia: 0,05			

Julgamentos do decisor DM2

Tabela C.9 - Julgamentos para os critérios gerais, DM2

Critérios	Benefício	Pesos
Custo	1	0,500
Benefício		0,500
Ind. Inconsistência: 0,00		

Tabela C.10 - Julgamentos para os critérios de Custo, DM2

Critérios	C. Estoque	C. Est. Trânsito	Pesos
C. Transporte	1/2	2	0,311
C. Estoque		2	0,493
C. Est. Trânsito			0,196
Ind. Inconsistência: 0,05			

Tabela C.11 - Julgamentos para os critérios de Benefício, DM2

Critérios	Segurança	Atendimento	Personalização	Manipulação	Pesos
Eficiência	4	2	8	8	0,476
Segurança		1	6	4	0,196
Atendimento			8	5	0,239
Personalização				3	0,034
Manipulação					0,061
Ind. Inconsistência: 0,05					

Tabela C.12 - Julgamentos para os critérios de Eficiência operacional, DM2

Subcritérios	Confiabilidade	Coleta confiável	Erro de entrega	Frequência	Pesos
Velocidade	1	3	2	9	0,330
Confiabilidade		2	2	9	0,303
Coleta confiável			1/2	8	0,139
Erro de entrega				9	0,202
Frequência					0,027
Ind. Inconsistência: 0,03					

Tabela C.13 - Julgamentos para os critérios de Segurança na prestação de serviços, DM2

Subcritérios	Histórico	Resp.	Cobertura/ acesso	Docum.	Pesos
Perda e dano	1/3	1	1	1/2	0,136
Histórico		1/2	1	1/2	0,193
Resposta rápida			1/2	1/2	0,175
Cobertura/acesso				1	0,218
Documentação					0,278
Ind. Inconsistência: 0,09					

Tabela C.14 - Julgamentos para os critérios de Atendimento ao cliente, DM2

Subcritérios	Cooperação	Comunicação	T.I.	Pesos
Qualidade pessoal	1	1	1	0,246
Cooperação		1	1/2	0,210
Comunicação			1	0,246
T.I.				0,298
Ind. Inconsistência: 0,02				

Tabela C.15 - Julgamentos para os critérios de fator de manipulação e manuseio, DM2

Subcritérios	Prog. Flexíveis	Capacid.	Op. Carga/ descarga	Rastr.	Pesos
Mudanças	1	2	3	1/5	0,193
Prog. Flexíveis		2	2	1/3	0,160
Capacidade			3	1/3	0,086
Op. carga/descarga				1/3	0,090
Rastreamento					0,411
Ind. Inconsistência: 0,06					

Tabela C.16 - Julgamentos para os critérios de Fator de personalização, DM2

Subcritérios	Relacionamento LP	Taxas flexíveis	Pesos
Compatibilidade	1	1/2	0,250
Relacionamento LP		1/2	0,250
Taxas flexíveis			0,500
Ind. Inconsistencia: 0,00			

Julgamentos do decisor DM3

Tabela C.17 - Julgamentos para os critérios gerais, DM3

Critérios	Benefício	Pesos
Custo	2	0,667
Benefício		0,333
Ind. Inconsistência: 0,00		

Tabela C.18 - Julgamentos para os critérios de Custo, DM3

Crítérios	C. Estoque	C. Est. Trânsito	Pesos
C. Transporte	1	1	0,333
C. Estoque		1	0,333
C. Est. Trânsito			0,333
Ind. Inconsistência: 0,00			

Tabela C.19 - Julgamentos para os critérios de Benefício, DM3

Crítérios	Segurança	Atendimento	Personalização	Manipulação	Pesos
Eficiência	1	1	3	2	0,261
Segurança		3	2	3	0,323
Atendimento			2	1	0,174
Personalização				2	0,131
Manipulação					0,112
Ind. Inconsistência: 0,06					

Tabela C.20 - Julgamentos para os critérios de Eficiência operacional, DM3

Subcritérios	Confiabilidade	Coleta confiável	Erro de entrega	Frequência	Pesos
Velocidade	1	1	1	2	0,227
Confiabilidade		1	1	2	0,227
Coleta confiável			1	1	0,197
Erro de entrega				1	0,197
Frequência					0,152
Ind. Inconsistência: 0,02					

Tabela C.21 - Julgamentos para os critérios de Segurança na prestação de serviços, DM1

Subcritérios	Histórico	Resp.	Cobertura/ acesso	Docum.	Pesos
Perda e dano	1	2	2	1	0,357
Histórico		1	1	1	0,161
Resposta rápida			1	1	0,161
Cobertura/acesso				2	0,178
Documentação					0,144
Ind. Inconsistência: 0,02					

Tabela C.22 - Julgamentos para os critérios de Atendimento ao cliente, DM3

Subcritérios	Cooperação	Comunicação	T.I.	Pesos
Qualidade pessoal	2	1	2	0,333
Cooperação		1	2	0,235
Comunicação			3	0,306
T.I.				0,125
Ind. Inconsistência: 0,03				

Tabela C.23 - Julgamentos para os critérios de fator de manipulação e manuseio, DM3

Subcritérios	Prog. Flexíveis	Capacid.	Op. Carga/descarga	Rastr.	Pesos
Mudanças	1	3	1	1	0,211
Prog. Flexíveis		2	2	1	0,231
Capacidade			2	3	0,202
Op. carga/descarga				1	0,118
Rastreamento					0,130
Ind. Inconsistência: 0,10					

Tabela C.24 - Julgamentos para os critérios de Fator de personalização, DM3

Subcritérios	Relacionamento LP	Taxas flexíveis	Pesos
Compatibilidade	3	2	0,550
Relacionamento LP		1	0,210
Taxas flexíveis			0,240
Ind. Inconsistencia: 0,02			

D - Comparação dos julgamentos agrupados através do método AHP-AIJ

As tabelas deste anexo apresentam os valores agrupados dos julgamentos dos decisores, bem como os pesos relativos de cada critério. A técnica AHP-AIJ utiliza a média geométrica dos valores individuais para definir o valor grupal. A equação D.1 representa a média geométrica e a equação D.2 o desvio padrão da média geométrica.

$$MG = \left(\prod_{i=1}^n a_i \right)^{1/n} = \sqrt[n]{a_1 \times a_1 \times a_1 \times \dots \times a_n} = \exp \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln a_i \right] \quad (D.1)$$

$$DPG = \exp \left[\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln(a_i) - \ln(MG)]^2}{n-1}} \right] \quad (D.2)$$

Considere, por exemplo, as comparações entre Custo vs Benefício realizado pelos três decisores, sendo DM1=2, DM2=1, DM3=2. A média geométrica (GM) é então definida como $\sqrt[3]{(2) \times (1) \times (2)} = 1,59$ e o desvio padrão geométrico é 0,140. A Tabela D.1 apresenta estes resultados. Novos índices de inconsistência devem também ser determinados.

Tabela D.1 - Julgamentos para os critérios gerais, DM3

Critérios	Benefício	Pesos
Custo	1,59 (0,140)	0,614
Benefício		0,386
Ind. Inconsistência: 0,00		

As Tabelas D.2-D.8 apresentam os valores agrupados dos julgamentos para os critérios restantes. Os valores negativos indicam valores inversos e os valores entre parêntesis o desvio padrão geométrico.

Tabela D.2 - Julgamentos para os critérios de Custo, DM3

Critérios	C. Estoque	C. Est. Trânsito	Pesos
C. Transporte	-1,59 (0,140)	2 (0,210)	0,340
C. Estoque		2 (0,210)	0,462
C. Est. Trânsito			0,198
Ind. Inconsistência: 0,02			

Tabela D.3 - Julgamentos para os critérios de Benefício, DM3

Critérios	Segurança	Atendimento	Personalização	Manipulação	Pesos
Eficiência	2 (0,210)	1,14 (0,292)	4,16 (0,198)	4 (0,210)	0,330
Segurança		1,10 (0,392)	2,88 (0,222)	2,88 (0,111)	0,219
Atendimento			4,31 (0,233)	2,92 (0,326)	0,292
Personalização				1,14 (0,292)	0,073
Manipulação					0,085
Ind. Inconsistência: 0,01					

Tabela D.4 - Julgamentos para os critérios de Eficiência operacional, DM3

Subcritérios	Confiabilidade	Coleta confiável	Erro de entrega	Frequência	Pesos
Velocidade	1,44 (0,222)	2,08 (0,222)	2,15 (0,255)	5,45 (0,304)	0,340
Confiabilidade		2,15 (0,255)	2 (0,210)	5,24 (0,292)	0,290
Coleta confiável			1,14 (0,292)	3,83 (0,407)	0,166
Erro de entrega				3,30 (0,362)	0,153
Frequência					0,051
Ind. Inconsistência: 0,000796					

Tabela D.5 - Julgamentos para os critérios de Segurança na prestação de serviços, DM1

Subcritérios	Histórico	Resp.	Cobertura/ acesso	Docum.	Pesos
Perda/dano	2,47 (0,274)	1,14 (0,292)	1,14 (0,292)	1,26 (0,140)	0,168
Histórico		1,14 (0,292)	1,59 (0,280)	1,26 (0,140)	0,246
Resposta rápida			1 (0,210)	1,26 (0,14)	0,186
Cobertura/acesso				1,26 (0,140)	0,189
Documentação					0,211
Ind. Inconsistência: 0,02					

Tabela D.6 - Julgamentos para os critérios de Atendimento ao cliente, DM3

Subcritérios	Cooperação	Comunicação	T.I.	Pesos
Qualidade pessoal	1,59 (0,140)	1,44 (0,222)	1,14 (0,292)	0,292
Cooperação		1,26 (0,140)	1,44 (0,321)	0,212
Comunicação			1,19 (0,437)	0,204
T.I.				0,291
Ind. Inconsistência: 0,01				

Tabela D.7 - Julgamentos para os critérios de fator de manipulação e manuseio, DM3

Subcritérios	Prog. Flexíveis	Capacid.	Op. Carga/descarga	Rastr.	Pesos
Mudanças	1,59 (0,28)	1,44 (0,32)	1 (0,333)	2,92 (0,326)	0,139
Prog. Flexíveis		2 (0,0)	2 (0,00)	2,08 (0,222)	0,225
Capacidade			1,82 (0,181)	1,26 (0,403)	0,160
Op. carga/descarga				3 (0,333)	0,107
Rastreamento					0,308
Ind. Inconsistência: 0,03					

Tabela D.8 - Julgamentos para os critérios de Fator de personalização, DM3

Subcritérios	Relacionamento LP	Taxas flexíveis	Pesos
Compatibilidade	1,82 (0,181)	1,44 (0,321)	0,345
Relacionamento LP		1,82 (0,181)	0,215
Taxas flexíveis			0,440
Ind. Inconsistencia: 0,01			