FABIANO GADINI STRINGHER

DESIGNAÇÃO DE ROTAS PARA FROTA DEDICADA EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE LINHA BRANCA

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

São Paulo 2004

FABIANO GADINI STRINGHER

DESIGNAÇÃO DE ROTAS PARA FROTA DEDICADA EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE LINHA BRANCA

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

Área de Concentração: Engenharia de Sistemas Logísticos

Orientador:

Prof. Dr. Hugo T. Y. Yoshizaki

São Paulo 2004

FICHA CATALOGRÁFICA

Stringher, Fabiano Gadini

Designação de rotas para frota dedicada em uma rede de distribuição de linha branca. São Paulo, 2004. 90 p.

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

- 1. Logística 2. Pesquisa Operacional 3. Transporte Carga Lotação 4. Linha Branca
- I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Professor Livre Docente Doutor Hugo T. Y. Yoshizaki pelas diretrizes seguras e permanente incentivo.

Aos José Júlio Pereira, Luís Roberto Santamaria, Daniel Ikeda e Sérgio Leme pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos Mestres Celso Mitsuo Hino e Irineu de Brito Júnior e ao Mestrando Frederico Abou Mourad por suas sugestões ao trabalho e fundamental apoio no desenvolvimento do modelo.

Aos Professores Nicolau Gualda, Miguel César Santoro, Marco Antônio Brinati, Claudio Barbieri Cunha e Rui Botter, que somados ao orientador, tiveram a visão e criaram o Programa de Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos da POLI-USP.

À minha esposa Jane, aos meus pais, Antônio e Celina, e aos meus irmãos Adriano e Claudia.

À Deus.

RESUMO

Esta dissertação apresenta um problema de otimização relacionado com a designação de rotas de carga completa para frota própria ou dedicada, visando a minimização dos custos de transporte numa rede de distribuição formada por fábricas uni-produto, centros de distribuição (consolidação) e clientes. Essas rotas são conjugadas formando ciclos fechados (viagens) para garantir a otimização do tempo através do movimento contínuo desta frota dedicada. A metodologia é aplicada em uma rede de distribuição de um fabricante de linha branca no Brasil.

Além dos resultados econômicos favoráveis, outras contribuições para o tema de conjugação de rotas foram encontradas nesta dissertação, tais como, a regra de formação de caminhos, o limite para conjugação de rotas numa rede de distribuição e o desenvolvimento de uma estrutura para custear esses caminhos conjugados. O modelo de programação linear inteira desenvolvido mostrou-se apto a resolver problemas de tamanho real em tempo factível, mesmo com recursos computacionais comuns.

ABSTRACT

This thesis presents an optimization problem regarding the assignment of truckload lanes to a private or dedicated fleet to minimize transportation costs in a distribution network formed by single-product plants, distribution (consolidation) centers and clients. These lanes are conjugated in order to form closed cycles (trips) to guarantee time optimization through continuous movement of this dedicated fleet. This methodology is applied to a distribution network of a white goods manufacturer in Brazil.

More than good economic results, there are others contributions for the theme of conjugated lanes in this thesis, such as, the rule of formation trips, the limit to conjugated lanes to a distribution network and the development of a structure to get the conjugated lanes' costs. The model of integer linear program that was development is capable to solve the real problems in a reasonable time, even if with regular computer.

SUMÁRIO

1	I	NTRODUÇÃO	1
	1.1	OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO	1
	1.2	DELIMITAÇÃO E RELEVÂNCIA DO PROBLEMA	1
	1.3	Organização do Trabalho	3
2	R	EVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
	2.1	O Problema de Otimização do Transporte Rodoviário de Carga	5
	2.2	CUSTOS DO TRANSPORTE	7
	2.3	MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA O TRANSPORTE DE LOTAÇÃO	10
3	N	IODELAGEM DO PROBLEMA	18
	3.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	18
	3.2	METODOLOGIA DO TRABALHO	19
	3.3	GERADOR DE CAMINHOS	20
	3.4	CALCULADOR DE CUSTOS PARA OS CAMINHOS	29
	3.5	MODELO MATEMÁTICO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA	35
	3.6	Análise de Sensibilidade	36
4	A	PLICAÇÃO EM CASOS-TESTE	37
	4.1	ESCOPO E PARÂMETROS DOS CASOS-TESTE	37
	4.2	APLICAÇÃO DO GERADOR DE CAMINHOS NOS CASOS-TESTE	44
	4.3	APLICAÇÃO DO CUSTEADOR DE CAMINHOS NOS CASOS-TESTE	46
	4.4	RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO DO CASO TESTE	47
	4.5	Análise de sensibilidade do Caso Teste	52
	4.6	Análise de Sensibilidade da Demanda	64
	4.7	RESULTADOS OBTIDOS NOS CASOS-TESTE	65
5	A	PLICAÇÃO NUMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE LINHA BRANCA	67
	5.1	ESCOPO E PARÂMETROS DE UMA RD DE LINHA BRANCA	67
	5.2	APLICAÇÃO DO GERADOR DE CAMINHOS EM UMA RD DE LINHA BRANCA	68
	5.3	APLICAÇÃO DO CUSTEADOR DE CAMINHOS EM UMA RD DE LINHA BRANCA	70
	5.4	RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO EM UMA RD DE LINHA BRANCA	71
	5.5	Análise de Sensibilidade da RD de Linha Branca	74

	5.6	RESULTADOS OBTIDOS NA APLICAÇÃO EM UMA RD DE LINHA BRANCA	.84
6	C	CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS	.85
	6.1	Conclusões	.85
	6.2	Propostas de Estudos Futuros	.86
	6.3	FINAL	.87
7	В	IBLIOGRAFIA	.88
A	NEX	XO	.91
	AN	EXO 1 - MEMORIAL DE CÁLCULO DO CUSTEADOR DE CAMINHOS	.91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Estrutura de Custos para o Transporte Rodoviário pela NTC	8
TABELA 2.2 - ESTRUTURA DE CUSTOS PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO TACLA (2003)	9
TABELA 2.3 - ESTRUTURA DE CUSTOS PARA O TRANSPORTE ALVARENGA; NOVAES (2000)	9
TABELA 2.4- ESTRUTURA DE CUSTOS PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO SOUZA (1999)	10
Tabela 2.5 - Estatísticas de casos práticos de otimização baseada em licitação	12
Tabela 3.1 – Matriz resultado do Gerador de Caminhos	20
TABELA 3.2 - RESULTADOS DO GERADOR DE CAMINHOS COM VÁRIAS ORIGENS E 10 DESTINOS	26
TABELA 3.3 - RESULTADO DO GERADOR DE CAMINHOS COM VÁRIAS ORIGENS E 100 DESTINOS	27
TABELA 3.4 CONT RESULTADO DO GERADOR DE CAMINHOS COM VÁRIAS ORIGENS E 100 DESTINOS	28
TABELA 3.5 - CENÁRIO ECONÔMICO CE 1	33
TABELA 4.1 - MATRIZ DISTÂNCIA ORIGEM/DESTINO RD1 (EM KM)	38
TABELA 4.2 - MATRIZ DISTÂNCIA ORIGEM/DESTINO RD2 (EM KM)	39
TABELA 4.3 - MATRIZ DISTÂNCIA ORIGEM/DESTINO RD3 (EM KM)	40
TABELA 4.4 - MATRIZ DISTÂNCIA ORIGEM/DESTINO RD4 (EM KM)	41
TABELA 4.5 - MATRIZ DISTÂNCIA ORIGEM/DESTINO RD5 (EM KM)	42
Tabela 4.6 - Matriz Distância Origem/Destino RD6 (em km)	43
Tabela 4.7 - Resultado do Gerador de Caminhos para Caso Teste	44
Tabela 4.8 - Resultado do Custeador de Caminhos - Casos-Teste	46
TABELA 4.9 - RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO- CUSTOS DE TRANSPORTE NOS CENÁRIOS	48
Tabela 4.10 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 11	49
Tabela 4.11 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 21	
Tabela 4.12 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 31	
Tabela 4.13 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 41	
Tabela 4.14 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 51	50
Tabela 4.15 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 61	
Tabela 4.16 - Resultado da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN11	
Tabela 4.17 - Resultado da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN21	55
Tabela 4.18 - Resultado da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN31	56
Tabela 4.19 - Resultado da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN41	57
Tabela 4.20 - Resultado da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN51	58
Tabela 4.21 - Resultado da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN61	
Tabela 4.22 - Cenários Utilizados na Análise de Sensibilidade	
Tabela 4.23 - Cenários Econômicos	
Tabela 4.24 - Redução do Custo de Transporte comparado à Base Atual	
Tabela 4.25 - Resultado Analise Sensibilidade - Demanda Aleatória - CN11	
Tabela 4.26 - Resultado Analise Sensibilidade - Demanda Aleatória - CN21	
TABELA 5.1 - RESULTADO DO GERADOR DE CAMINHOS PARA CENÁRIO 71 (CASO REAL 3X55)	
TABELA 5.2 DECLI TADO DO CLISTEADOR DE CAMINIJOS. CASO DE AL CN71 EU TRO D	

TABELA 5.3 - RESULTADO DO MODELO MATEMÁTICO- CUSTOS - CENÁRIO 71 FILTRO D71
Tabela 5.4 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 71 filtro D72
Tabela 5.5 - Relatório de Saída do Modelo de Programação Linear Inteira CN71 filtro D 72
Tabela 5.6 - Resultado do Modelo Matemático - Detalhado - Cenário 71 filtro D73
Tabela 5.7 - Resultado da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN71 filtro D 74
TABELA 5.8 - RESULTADO DO GERADOR DE CAMINHOS PARA CN 81 (CASO REAL EXPANDIDO)79
Tabela 5.9 - Resultado do Modelo Matemático- Custos - Cenário 81 filtro D
Tabela 5.10 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 81 filtro D
TABELA 5.11 - RESULTADO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE POR TIPO DE CAMINHO CN81 FILTRO D 81

LISTA DE FIGURAS E QUADROS

Figura 1.1 - Mapa da Rede de Distribuição da Empresa Estudada	2
FIGURA 1.2 - EXEMPLO DE ROTA OU CAMINHO CONJUGADO	3
Quadro 2.1 - Modelo Geral de Designação de Transportador	. 11
QUADRO 2.2 - MODELO DE DESIGNAÇÃO DE TRANSPORTADOR COM LICITAÇÕES CONDICIONADAS	. 13
FIGURA 2.3 - ESQUEMAS DE ROTAS CONVENCIONAIS E ROTA COMPOSTA	. 15
FIGURA 3.1 – METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FLUXO EM REDE	. 19
FIGURA 3.2 – ESQUEMAS DOS TIPOS DE CAMINHOS GERADOS	. 21
FIGURA 3.3 - GRÁFICO DA REGRA DE GERAÇÃO DE CAMINHOS COM TODOS OS TIPOS DISPONÍVEIS	. 25
FIGURA 3.4 - GRÁFICO DO CUSTO VIAGEM CO X C1	. 34
FIGURA 4.1 - REDE DE DISTRIBUIÇÃO RD1 COM 3 ORIGENS E 3 DESTINOS EXTERNOS	. 38
FIGURA 4.2 - REDE DE DISTRIBUIÇÃO RD2 COM 30RIGENS E 3 DESTINOS INTERNOS	. 39
FIGURA 4.3 - REDE DE DISTRIBUIÇÃO RD3 COM 4 ORIGENS E 4 DESTINOS EXTERNOS	. 40
FIGURA 4.4 - REDE DE DISTRIBUIÇÃO RD4 COM 4 ORIGENS E 4 DESTINOS INTERNOS	.41
Figura 4.5- Rede de Distribuição RD5 com 5 origens e 5 destinos Externos	. 42
FIGURA 4.6 - REDE DE DISTRIBUIÇÃO RD5 COM 5 ORIGENS E 5 DESTINOS INTERNOS	. 43
Figura 4.7 - Desenho das Rotas Geradas (Exemplos)	. 45
FIGURA 4.8 - GRÁFICO CUSTO FIXO X CUSTO VARIÁVEL NO TRANSPORTE CN11	. 54
FIGURA 4.9 - GRÁFICO CUSTO FIXO X CUSTO VARIÁVEL NO TRANSPORTE CN21	. 55
FIGURA 4.10 - GRÁFICO CUSTO FIXO X CUSTO VARIÁVEL NO TRANSPORTE CN31	.56
FIGURA 4.11 - GRÁFICO CUSTO FIXO X CUSTO VARIÁVEL NO TRANSPORTE CN41	. 57
FIGURA 4.12 - GRÁFICO CUSTO FIXO X CUSTO VARIÁVEL NO TRANSPORTE CN51	. 58
FIGURA 4.13 - GRÁFICO CUSTO FIXO X CUSTO VARIÁVEL NO TRANSPORTE CN61	. 59
FIGURA 4.14 - GRÁFICO DA REDUÇÃO DO CUSTO DE TRANSPORTE COMPARADO À BASE ATUAL	. 63
FIGURA 4.15- RESUMO DOS RESULTADOS DA CN 1	. 66
FIGURA 4.16 - RESUMO DOS RESULTADOS DA CN 2	. 66
FIGURA 5.1 - MAPA DE FLUXO DE VIAGENS COMPLETAS EM 2002	. 67
FIGURA 5.2 - EXEMPLOS DE ROTAS CONJUGADAS DA SOLUÇÃO ÓTIMA CN71 FILTRO D	. 69
FIGURA 5.3 - GRÁFICO CUSTO FIXO X CUSTO VARIÁVEL NO TRANSPORTE CN71 FILTRO D	.75
FIGURA 5.4 - GRÁFICO CUSTO DO TRANSPORTE POR TIPO DE CAMINHO CN71 FILTRO D	.76
Figura 5.5 - Gráfico da Análise de Sensibilidade de Demanda CN71	.77
Figura 5.6 - Gráfico do No de Iterações para Solução Ótima - CN71	.78
FIGURA 5.7 - EXEMPLOS DE ROTAS CONJUGADAS DA SOLUÇÃO ÓTIMA CN81 FILTRO D	. 80
FIGURA 5.8 - RESULTADO DO MODELO MATEMÁTICO - DETALHADO - CENÁRIO 81 FILTRO D	. 81
FIGURA 5.9 - GRÁFICO CUSTO FIXO X CUSTO VARIÁVEL NO TRANSPORTE CN81 FILTRO D	. 82
FIGURA 5.10 - GRÁFICO CUSTO DO TRANSPORTE POR TIPO DE CAMINHO CN81 FILTRO D	. 83
FIGURA 5.11 - GRÁFICO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE POR TIPO DE CAMINHO CN81 FILTRO D	.83

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo da Dissertação

Este trabalho objetiva a otimização de transporte na distribuição nacional de produtos da linha branca (eletrodomésticos como refrigeradores, lavadoras, fogões, fornos de microondas e condicionadores de ar), através de um modelo de programação linear inteira, que utiliza o conceito de designação de rotas com frota dedicada para carga lotação.

1.2 Delimitação e Relevância do Problema

A Empresa que serviu de base para o estudo apresenta uma característica importante, do ponto de vista da busca do transporte com frota dedicada, pois suas fábricas são uniproduto, isto é, produzem apenas um tipo de eletrodoméstico.

Estas fábricas, mostradas na Figura 1.1, abastecem os grandes clientes e os CDC's (*cross docking centers*) formando uma rede de distribuição direta, que serão o foco deste trabalho. Os CDC's, que são transportadores regionais, atendem os clientes fracionados por todo o país, formando uma rede de distribuição consolidada. Como as fábricas atendem todo o país, podem gerar viagens com destinos próximos às outras origens (fábricas), ou seja, existe um potencial para criação de viagens paralelas, que são possíveis candidatas para rotas ou caminhos conjugados.

Rotas ou caminhos conjugados são combinações de viagens produtivas com viagens não-produtivas, fechando um ciclo completo, como mostrado na Figura 1.2.

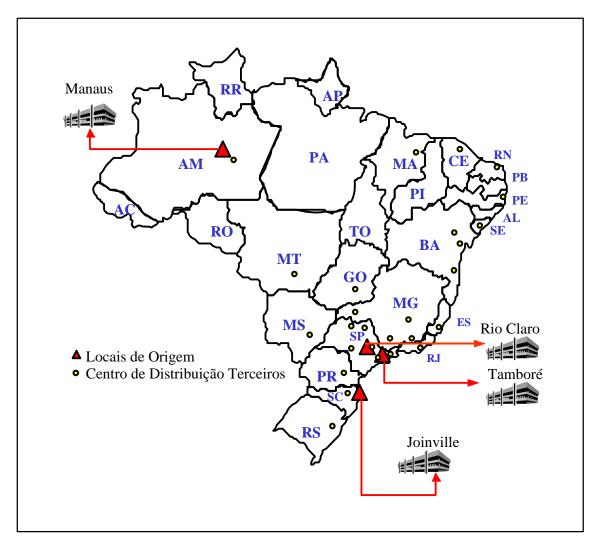


Figura 1.1 - Mapa da Rede de Distribuição da Empresa Estudada

O conceito básico desse modelo será o de buscar conjugar viagens, criando com isso, o movimento contínuo do veículo, aumentando sua produtividade e consequentemente reduzindo a parcela de custo fixo por quilometragem.

Indo um pouco além desse conceito, pode-se também buscar uma mudança na remuneração desse transporte, atualmente pago por viagem, para um modelo baseado em frota dedicada, que, ao reduzir consideravelmente o risco de o transportador ter ociosidade da frota, gere um ganho econômico que possa ser compartilhado entre os envolvidos.

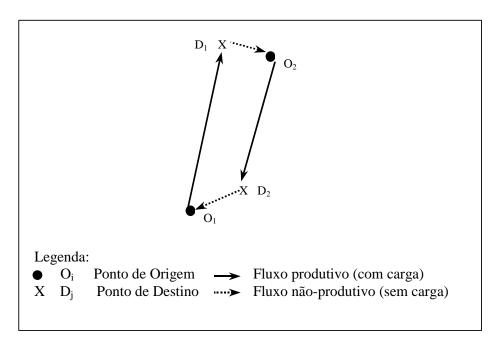


Figura 1.2 - Exemplo de Rota ou Caminho Conjugado

Esse modelo de pagamento de uma frota dedicada, ao invés de remunerar por viagens, tem um sistema de remuneração composto por um componente fixo e outro variável por quilômetro.

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho foi encontrada no fato de a literatura de otimização sobre o tema de transporte rodoviário estar focada principalmente no caso de carga fracionada e na busca de sua otimização através de algoritmos de roteirização - vide BODIN et al. (1983), CUNHA (1991), CUNHA (1997), CUNHA;GUALDA (1997) e CUNHA (2000) - enquanto o caso de carga lotação - vide SOUZA (1999) e TACLA (2003) - talvez por sua aparente simplicidade conceitual, tem poucos trabalhos publicados mostrando bom potencial para desenvolvimento de pesquisa. ¹

1.3 Organização do Trabalho

A dissertação é composta por seis capítulos e foi estruturada de forma a mostrar, além da aplicação de modelo de programação linear inteira, o conceito do processo de

¹ Yoshizaki, H. T. Y. (Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Brasil). **Notas de Aula**, 2001.

modelagem de geração de caminhos conjugados e de custos do transporte de carga lotação.

Para validação desse modelo, foram desenvolvidos vários casos-teste com topologias de rede de distribuição em escala reduzida. Após esta validação, foi feita a aplicação do modelo em uma rede de distribuição nacional de uma indústria de linha branca.

Neste trabalho, o primeiro capítulo delineia o escopo do estudo mostrando o objetivo e onde o problema em questão se encaixa.

O segundo capítulo aborda a literatura pertinente ao projeto da rede de distribuição (no ponto de vista do embarcador), ao processo de modelagem e aos modelos de transporte, à formação de rotas e aos custos de transporte.

O terceiro capítulo descreve o problema, a metodologia empregada e sua modelagem, bem como o levantamento dos custos de transporte, o processo de geração de caminhos e a determinação dos parâmetros utilizados na modelagem.

No quarto capítulo desenvolve-se a validação da metodologia com a aplicação de vários casos-teste, em pequena escala e com topologias de redes diversas.

No quinto capítulo tem-se a aplicação da metodologia em uma rede de distribuição nacional de Linha Branca e são comentados os resultados dos cenários abordados.

E finalmente, no sexto capítulo é concluído o trabalho, apresentadas propostas para desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda a literatura pertinente ao projeto da rede de distribuição (no ponto de vista do embarcador), ao processo de modelagem e aos modelos de transporte, à formação de rotas e aos custos de transporte.

2.1 O Problema de Otimização do Transporte Rodoviário de Carga

Segundo BALLOU (1999), o transporte usualmente representa, para a maioria das empresas, o elemento mais importante nos custos logísticos, podendo absorver de um a dois terços deste custo. Desta forma, num mercado competitivo, é fundamental que uma empresa possua um sistema de transporte eficiente, que garanta qualidade de serviço adequada a baixos custos, para se destacar no mercado.

Os Sistemas de Transporte podem ser classificados, segundo CAPLICE; SHEFFI (2003), em Diretos ou Consolidados. Os transportadores de carga lotação (*Truckload-TL*) operam em rotas irregulares e se deslocam da origem até o destino sem paradas intermediárias para consolidação de carga e, portanto, são um modal direto. Já os transportadores de consolidação, tais como os de carga fracionada (*Less-than-truckload-LTL*) e de entregas expressas, necessitam de terminais e rotas programadas para coletar pequenas cargas e consolidá-las em uma carga completa. Como pode ser visto em TACLA (2003), a maior parte da literatura de otimização de transporte rodoviário se concentra na carga fracionada. Uma das dificuldades do presente estudo foi, justamente, a parca literatura existente sobre o assunto.

No caso de Sistemas de Transportes Diretos, que é o foco deste trabalho, a maior parte da estrutura de custos pode ser dividida em duas atividades: movimento produtivo (*line-haul movement*) e conexão para a próxima carga. Os custos do movimento produtivo são principalmente variáveis com a distância (combustível, pneus, motorista). Os custos associados à conexão para a próxima carga consistem dos movimentos improdutivos (*deadheading or backhaul*), que são deslocamentos com o veículo vazio de sua posição atual até o local de uma nova carga e dos tempos de busca (*dwell time*), que

compreendem o tempo que o motorista deve aguardar nesse novo local até identificar a próxima carga. O custo de fazer a conexão jamais é conhecido com certeza pelo transportador devido ao prazo reduzido de contratação e sobretudo pela variação espaço-temporal da demanda dos embarcadores.

Esta incerteza nos custos de conexão cria interdependências onde o custo de transportar por uma rota é afetado por outras rotas que o transportador atende. O retorno vazio (backhaul) é o mais óbvio exemplo dessa interdependência. O custo de transportar de A até B poderá ser menor se o veículo tiver maior probabilidade de obter cargas saindo de B ou cargas chegando em A. Este é um exemplo de economia de escopo, pois o custo de atender uma rota não depende do volume desta rota (o que seria um exemplo de economia de escala), mas se outras rotas são atendidas. As Economias de Escopo estão presentes se o custo total para um transportador atender a um conjunto de rotas é menor do que o custo de vários transportadores atenderem as mesmas rotas. As Operações de Carga Completa mostram significativas economias de escopo, especialmente em rotas com altos níveis de confiabilidade e volume de tráfego constante. Esta impossibilidade de estimar com acurácia os custos de conexão pode levar o transportador a colocar margens para se proteger dessa incerteza, aumentando os custos e consequentemente os preços (fretes).

Este descrição de Sistema de Transporte Direto, na visão do autor, está diretamente relacionada com um tipo de serviço *spot*, ou de frota não-dedicada, onde o embarcador contrata o transportador apenas para a viagem de ida, não se responsabilizando pelo retorno.

No caso de Sistemas de Transporte Consolidados, os trabalhos como os de MATOS (1997) e CARVALHO (1981), mostram que a estrutura de custo está dividida em três atividades: coleta-entrega, consolidação e transferência. Os custos de transferência têm paralelo com a estrutura de custos dos Sistemas Diretos; entretanto, ganham eficiência ao reduzir as incertezas pois, normalmente, os transportadores que prestam esse tipo de serviço contam com programações definidas de transferência para garantir o prazo de entrega contratado. Por outro lado, as estruturas de coleta-entrega e consolidação possuem um componente de custo fixo muito importante (aluguéis de terminais, frotas

urbanas alocadas e equipes administrativas). Neste caso, portanto, o preço do serviço é diretamente influenciado pelo volume de carga a ser atendido, o que caracteriza a economia de escala.

Enquanto o Sistema de Transporte Direto conta com a incerteza no custo de conexão, o Sistema Consolidado, por sua vez, apresenta a incerteza de volume. As coletas são realizadas durante o dia e normalmente não são conhecidos seus volumes. Logo, o transportador de carga fracionada precisa arcar com uma ociosidade sistêmica para garantir o nível de serviço. Neste caso, os preços praticados (frete) embutem uma margem para se proteger desse tipo de incerteza.

2.2 Custos do Transporte

Os modelos de custos de transporte desenvolvidos pela NTC - Associação Nacional de Empresas de Transporte de Carga são referência para os transportadores, que necessitam conhecer sua própria estrutura de custos e adaptar esse modelo padrão à sua realidade (www.ntc.org.br). A Tabela 2.1 mostra a estrutura básica de custo para o veículo.

Entretanto, como lembra a NTC, este custo de operação não pode ser confundido com o custo total do transporte. Para se ter este custo, o transportador deve considerar também:

- Despesas administrativas
- Despesas de terminais
- Custo valor (ligado a acidentes e avarias)
- Gerenciamento de Risco (ligados aos desvios de cargas)
- Impostos e Taxas
- Lucro

Tabela 2.1 - Estrutura de Custos para o Transporte Rodoviário pela NTC

CUSTOS FIXOS MENSAIS	CUSTOS VARIÁVEIS POR KM
a - Remuneração de capital	a - Peças, acessórios e materiais de manutenção
b - Salário do motorista	b - Combustíveis
c - Salário de oficina	c - Lubrificantes
d - Reposição do veículo	d - Lavagem e lubrificação
e - Reposição da carroceria	e - Pneus
f - Licenciamento	
g - Seguro do casco do veículo	
h - Seguro do Equipamento	
i - Seguro de responsabilidade civil facultativa	

Fonte: Departamento de Custos Operacionais e Pesquisas Econômicas - DECOPE/NTC

Entretanto, existem outros modelos de custo de transporte ARNOLD; CHAPMAN (2001), ALVARENGA; NOVAES (2002); NOVAES (2001), SOUZA (1999), TACLA (2003), cuja principal diferença está no fato de não considerarem reposição do veículo e da carroceria, mas sim o custo de capital, como exemplificado da Tabela 2.2 à Tabela 2.4. Pelo menos, esta é a primeira impressão.

Na verdade quando se analisa com detalhe a maneira de cálculo das estruturas, percebese que são equivalentes em termos de tópicos, pois enquanto a estrutura da NTC separa remuneração de capital e reposição do veículo, as demais estruturas os calculam no mesmo item, chamando-o de custo de capital. Como exemplificado no cálculo do custo de capital segundo ALVARENGA; NOVAES (2000).

Custo de Capital (R\$/mês) =
$$(I - R) * FRC + R * i$$
. (1)

onde:

I = investimento inicial;

R = valor residual ao fim do período de vida;

FRC = fator de recuperação de capital;

i =taxa mensal de juros.

$$FRC = \frac{j * (1+j)^n}{(1+j)^n - 1}$$
 (2)

onde:

j = taxa mensal de juros (em %) dividida por 100;

n= vida útil em meses;

A NTC, por sua vez, calcula o custo de capital de ALVARENGA; NOVAES (2000) decomposto em duas parcelas, chamadas remuneração de capital e reposição do veículo, mostradas nas equações abaixo:

Remuneração de Capital =
$$I * i$$
 (3)

Reposição do veículo =
$$(I - R)/n$$
 (4)

Tabela 2.2 - Estrutura de Custos para o Transporte Rodoviário TACLA (2003)

Custo Fixo Mensal	Considera as parcelas de custo de capital, impostos/taxas,						
	seguro equipamento, remuneração do motorista, do pessoal						
	administrativo e operacional e despesas adm./operacionais						
Custo Variável	Considera combustível, manutenção, pneus, lubrificante e						
	seguro da carga						

Fonte: TACLA (2003)

Tabela 2.3 - Estrutura de Custos para o Transporte ALVARENGA; NOVAES (2000)

	Considera as parcelas de custo de capital, impostos/taxas, seguro equipamento, remuneração do motorista, do pessoal operacional
Custo Variável	Considera combustível, manutenção, pneus, lubrificante (cárter e câmbio) e Lavagem

Fonte: ALVARENGA; NOVAES (2000)

Tabela 2.4- Estrutura de Custos para o Transporte Rodoviário SOUZA (1999)

Custo Fixo	Considera as parcelas de custo de capital, impostos/taxas,
	seguro equipamento.
Custo Variável	Considera combustível, manutenção, pneus, lubrificante (cárter
	e câmbio) e Lavagem
Custo Motorista e	Considera remuneração do motorista, do pessoal operacional
Ajudante	

Fonte: MERCEDEZ BENS (1992) apud SOUZA (1999)

Portanto, como não há grandes diferenças nas estruturas será utilizada a estrutura da NTC para os cálculos dos custos de transporte dedicado, sendo de fundamental importância para o desenvolvimento deste trabalho.

2.3 Modelos de Otimização para o Transporte de Lotação

POWELL et al. (1988) é um dos primeiros trabalhos encontrados que tratam do transporte de carga lotação. O enfoque deste trabalho está na decisão do transportador em deslocar a frota de veículos ou mantê-la no terminal atual para maximizar a rentabilidade do negócio, de acordo com a probabilidade de surgirem requisições de transporte. O modelo desenvolvido é aplicado no Nível Operacional de decisão, isto é, está preocupado em resolver o problema do dia-a-dia do posicionamento da frota.

Outro trabalho focado no Nível Operacional, mas com o enfoque do embarcador foi o de MOORE et al. (1991), que desenvolveram uma central de operações de transporte através de licitações com transportadores, modelos de programação inteira mista e simulação para minimizar o custo de transporte e melhorar o nível de serviço (prazo de entrega).

O trabalho de BREWER; PLOTT (2002), tratou do problema de minimização do custo do deslocamento vazio de contêineres e foi desenvolvido com base num modelo de licitação entre os transportadores prestadores deste serviço.

CAPLICE (1996) e CAPLICE; SHEFFI (2003) desenvolveram também um modelo que otimiza uma rede de distribuição através do conceito de licitação (*procurement*), focado no transporte de carga lotação. Este modelo, descrito no Quadro 2.1, busca a minimização do custo de transporte, do ponto de vista do embarcador, tendo transportadores suficientes para atender o volume de viagens esperado.

$$\min \sum_{k} C^{k} * x^{k}$$

Sujeito a:

$$\sum_{k} x^{k} = \mathbf{D} \tag{1}$$

$$x^k \in X \ \forall k \tag{2}$$

onde:

x ^k vetor de volume para rota (segmento) designado para o transportador k, medido em número de viagens

 $c^k * x^k$ função de custo do transportador k atender o vetor de rotas x^k

D vetor de volume de demanda de cada rota medido em número de viagens

X conjunto de todos os possíveis volumes alocados e rotas designadas

Quadro 2.1 - Modelo Geral de Designação de Transportador Fonte: CAPLICE; SHEFFI (2003)

Este modelo esta sujeito às seguintes restrições: (1) garantia de atendimento de demanda em cada rota. (2) garantia de que cada rota alocada e seu respectivo volume são viáveis, tanto para o transportador como para o embarcador. A função de custo $C^k * x^k$ e o conjunto de possíveis designações, X, são determinadas pelo embarcador baseado nas respostas dos transportadores.

Segundo CAPLICE; SHEFFI (2003), a definição mais específica da função de custo C^k * x^k , diz que ela deve representar o custo do transportador em atender uma carga adicional em cada rota como uma função de todas as outras cargas atendidas em cada rota de seu sistema. Essa função, que deveria especificar o completo relacionamento entre os preços, as rotas e os volumes, é extremamente difícil de ser conhecida na teoria, e muito menos encontrada na prática. Ele justifica, portanto, essa busca da função custo indiretamente através de um processo de licitação, obtendo cotações com os transportadores.

A busca de otimização do custo de transporte está baseada na conjugação de rotas do embarcador licitante com outras rotas de outros embarcadores pelos transportadores, que, segundo CAPLICE; SHEFFI (2003), possuem as melhores condições de conjugar rotas baseados em suas próprias perspectivas e redes. E este potencial de redução de custo do transporte é tanto maior quanto maiores forem os volumes do embarcador licitante e o número de transportadores convidados ou contratados, conforme mostra Tabela 2.5, que retrata a experiência prática dos autores.

Tabela 2.5 - Estatísticas de casos práticos de otimização baseada em licitação

	Mínimo	Médio	Máximo
Número de Rotas	136	1.800	10.000
Número Anual de Viagens	~6.000	~200.000	~1.500.000
Número de Transportadores Convidados	15	120	500
Número de Transportadores Contratados	8	64	300
Redução Inicial no Custo de Transporte	3%	13%	24%
(sem considerar fatores de serviço)			
Redução Final no Custo de Transporte	0%	6%	17%
(considerando fatores de serviço)			
Duração do Processo da Licitação (em	<1	3	6 ou +
meses)			

Fonte: CAPLICE; SHEFFI (2003)

Seguem alguns exemplos de pacotes (conjunto de rotas) propostos por transportadores licitados:

- Criar um pacote que consiste de todas as rotas dentro e fora de uma região com o objetivo de melhorar o balanço do novo fluxo com os clientes existentes;
- Criar um pacote com um conjunto de volumes de fluxo em uma nova região assegurando que se o transportador é agraciado com qualquer fluxo em um novo mercado, ele tenha presença com volume suficiente para sustentar o nível de serviço;
- Criar uma série de pacotes com rotas estabelecidas para que o transportador possa ganhar qualquer um desses potenciais pacotes, mas não todos eles;
- Criar pacotes baseados na atual rede do transportador em conjugação com as rotas do processo de licitação.

$$\min \sum_{k} \sum_{p} C_{p}^{k} * x_{p}^{k}$$

Sujeito a:

$$\sum_{k} \sum_{p} \mathcal{S}_{ij}^{pk} x_{p}^{k} = \mathbf{1}, \forall ij$$
 (1)

$$x_p^k = [0,1] (2)$$

Onde:

Índices:

i : Locais de Origem de Carregamentos

j: Locais de Destino de Carregamentos

p: Pacotes de rotas numa licitação condicional

k: Identificação do Transportador

Variáveis de Decisão

 x_p^k : =1 se transportador k é designado para todas as rotas do pacotep,

= 0 por outro lado

Dados:

 δ_{ii}^{pk} = 1 se o pacote p do transportador k contem a rota ij, = 0 por outro lado

 C_k^p custo anual total do transportador k atender o pacote de linhas p.

Quadro 2.2 - Modelo de Designação de Transportador com Licitações Condicionadas

Fonte: CAPLICE; SHEFFI (2003)

No Quadro 2.2 é apresentado o Modelo de Designação com Licitação Condicional (CACB), de CAPLICE; SHEFFI (2003), que tem como objetivo minimizar o custo anual de frete. O conjunto de restrições (1) garante que cada rota é coberta por exatamente um transportador primário e (2) define que todas as variáveis são binárias. Nota-se que, se a restrição de variável inteira for relaxada, serão designadas frações de rotas, isto é, quando transportadores ganham parte e não todo o volume da rota.

Embora os argumentos de CAPLICE; SHEFFI (2003) sejam válidos, o conceito do presente trabalho difere na estratégia de implantação de otimização da rede, onde ao invés de buscar preços no mercado de transporte para otimizar a rede através das propostas, acredita-se que a melhor maneira está no conhecimento do custo da operação pelo embarcador e a otimização de sua rede buscando a conjugação de suas rotas. Entretanto, o CACB é a base do modelo de otimização empregado no presente estudo.

Outro trabalho que utiliza a estratégia de concorrências para reduzir o custo de transporte para o embarcador é o de LEDYARD *et. al.*(2002). Neste trabalho a Sears Logistics Services (SLS), que é uma subsidiária da Sears, Roebuck and Co., serviu de base para o desenvolvimento e aplicação do modelo.

O trabalho de TACLA (1999) teve por objetivo de propiciar ao Operador Logístico um planejamento ótimo para gestão e dimensionamento de uma frota de caminhões tanque especializados em transporte a granel, com demanda de carga conhecida.

O modelo desenvolvido visa a otimização através do aproveitamento de rotas compostas viáveis sob o ponto de vista operacional e de compatibilidade entre os produtos transportados em cada trecho. Com isso o custo de transporte seria otimizado, pois o veículo tem seu deslocamento improdutivo (vazio) reduzido.

Na Figura 2.3 mostram-se os esquemas das rotas convencionais (a) e rota composta (b).

Em TACLA (2003) é estudado o Transporte Colaborativo no caso da soja e do fertilizante, onde a redução de custo de transporte está fundamentada na maximização da utilização do veículo, que é obtida através do transporte conjugado.

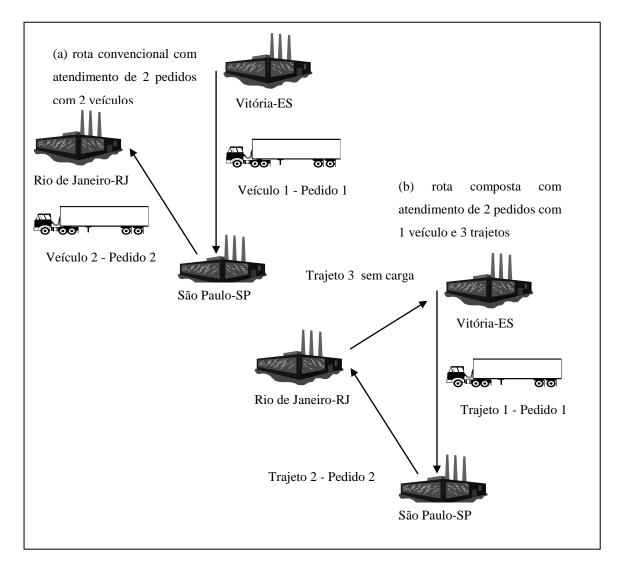


Figura 2.3 - Esquemas de rotas convencionais e rota composta. Fonte: Adaptado de TACLA (1999)

Entre as contribuições deste trabalho estão:

- a) Utilização do Planejamento Hierárquico da Decisão, desenvolvido em YOSHIZAKI (1996) e CRAINIC; LAPORTE (1997), onde os níveis Estratégico, Tático e Operacional do Planejamento são considerados em modelos matemáticos interdependentes;
- b) A Definição de um filtro para limitar a quantidade gerada de caminhos conjugados. Este filtro diz que uma viagem conjugada deve ser utilizada no modelo matemático apenas quando seu custo for inferior a soma dos custos das viagens independentes.

Entre os pontos identificados como desenvolvimento têm-se:

- a) O Processo de Geração do Transporte Conjugado, bem como o seu dimensionamento;
- b) O Potencial de redução do Custo do Transporte com a utilização do transporte conjugado, onde no trabalho foram adotados os ganhos de 12% inicialmente e na aplicação foi utilizado 6%;
- c) A extrapolação dos ganhos obtidos em uma região para toda a rede.

Outro trabalho que aplicou o conceito de Planejamento Hierárquico de uma rede de distribuição foi GUPTA et al. (2002), onde o Laboratório Pfizer/Warner-Lambert serviu de base para o desenvolvimento de um Sistema de Suporte a Decisão hierarquizado.

SOUZA (1999) em sua dissertação de mestrado tratou também do problema de otimização de sistema de transporte de carga lotação, dividindo-o em duas etapas. A primeira etapa consiste em gerar todos os roteiros viáveis e seus custos associados, ou seja, todos os roteiros que satisfaçam as restrições operacionais do problema, tais como: janelas de tempo, capacidade, rota, entre outros. Na segunda etapa, com posse de todos os roteiros viáveis e seus respectivos custos associados gerados na primeira etapa, são selecionados os melhores roteiros, resolvendo-se um problema de programação linear do tipo partição de conjunto (*Set Partitioning Problem*), buscando a minimização dos custos.

Esta abordagem porém, inviabiliza a resolução de problemas de grande porte, principalmente aqueles com condicionantes pouco restritivos. Nestes casos, o conjunto de roteiros viáveis é composto por um grande número de alternativas, inviabilizando o processamento da segunda etapa. Para contornar este problema, SOUZA (1999) recomenda a utilização de uma heurística que faça uma seleção prévia dos roteiros ou a implementação de um procedimento mais eficiente (sugere como exemplo o método de geração de colunas) para resolução da segunda etapa do problema. Apesar da metodologia proposta, quando aplicada a problemas de pequeno porte, fornecer a solução ótima, não se mostra eficiente na resolução de problemas mais completos.

Como conclusão desse capítulo tem-se que existem poucas referências sobre a otimização de redes de transporte para carga lotação (TL), mas mesmo assim, as referências encontradas são suficientes para o desenvolvido do problema tratado nesta dissertação.

3 MODELAGEM DO PROBLEMA

Este capítulo descreve o problema, a metodologia empregada e sua modelagem, bem como o levantamento dos custos de transporte, o processo de geração de caminhos e a determinação dos parâmetros utilizados na modelagem.

3.1 Descrição do Problema

O problema de Designação de Rotas para Frota Dedicada tratado neste trabalho visa exatamente a redução do custo de transporte para o embarcador através da minimização do risco de conexão do transportador tratado no capítulo 2.

Os embarcadores normalmente contratam o serviço de transporte para distribuição (*outbound*) de carga lotação através de contratos que remuneram o valor da viagem origem/destino. Os contratos de frota dedicada estão normalmente associados ao abastecimento de fábricas (*inbound*) e transferências para centros de distribuição.

As hipóteses para o tratamento do problema estão descritas a seguir:

- Frota Homogênea;
- Utilização de um motorista por equipamento;
- Cargas completas
- Unidade das variáveis de decisão em viagens por arco.

A frota homogênea significa que os veículos têm o mesmo padrão e portanto são compatíveis em termos de capacidade e de compatibilidade de produtos.

A utilização de um motorista por equipamento determina o tempo total disponível do conjunto veículo/motorista.

As cargas completas não significam necessariamente 100% de ocupação e sim viagens com uma origem e um destino.

A unidade de medida da demanda do modelo está em viagens anuais por par origemdestino, generalizando o modelo ao não considerar as particularidades dos produtos transportados como dimensões e peso.

3.2 Metodologia do Trabalho

A metodologia desenvolvida para solução do problema de fluxo de rede está representada na Figura 3.1, onde os processos de gerar e custear os caminhos precedem o modelo de programação linear inteira, que resultará no fluxo em rede otimizado dos pares de viagens origem/destino distribuídas em caminhos diretos ou combinados.

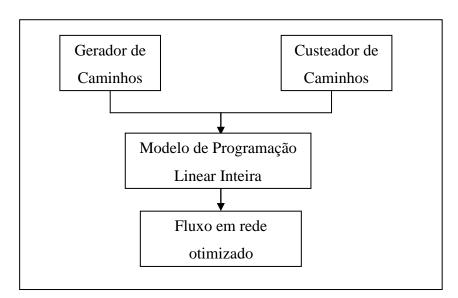


Figura 3.1 – Metodologia desenvolvida para solução do problema de fluxo em rede

Os processos de Geração de Caminhos e Custeador de Caminhos foram desenvolvidos no software *VBA* (*Visual Basic for Applications*), © Microsoft. - ALBRIGHT (2001).

O Modelo de Programação Linear Inteira foi desenvolvido em GAMS 20.0 rev121, utilizando como *solver* o CPLEX 7.0.

Para a aplicação desta metodologia foi utilizado um computador do tipo Laptop IBM Pentium III, com CPU de 1,2 GHz, 128 MB de RAM e HD de 30 GB.

3.3 Gerador de Caminhos

O Processo de geração de caminhos utiliza como base os pontos de origem (Oi) e destino (Dj) para combinar os arcos em caminhos (P), formando uma matriz de números binários, com os arcos nas linhas e os caminhos nas colunas. Essa matriz esta exemplificada na Tabela 3.1, que mostra um caso em que os caminhos são formados por combinações de até 2 arcos produtivos.

Tabela 3.1 – Matriz resultado do Gerador de Caminhos

Arcos	Caminhos (P)									
(OiDj)	P1	P2	•••	P5	P6		P10	P11		Pk
(DjOi)										
O_1D_1	1	0		1	0		1	0		0
O_1D_2	0	1		0	1		0	1		1
O_2D_1	0	0		0	0		0	1		0
O_2D_2	0	0		0	0		1	0		0
•••										
O_iD_j	0	0		0	0		0	0		1
$\mathbf{D_1O_1}$	0	0		1	0		0	1		0
D_1O_2	0	0		0	1		1	0		1
D_2O_1	0	0		0	0		1	0		0
D_2O_2	0	0		0	0		0	1		0
••••										
$\mathbf{D_{j}O_{i}}$	0	0		0	0		0	0		1

Os esquemas dos tipos de caminhos formados são apresentados na Figura 3.2.

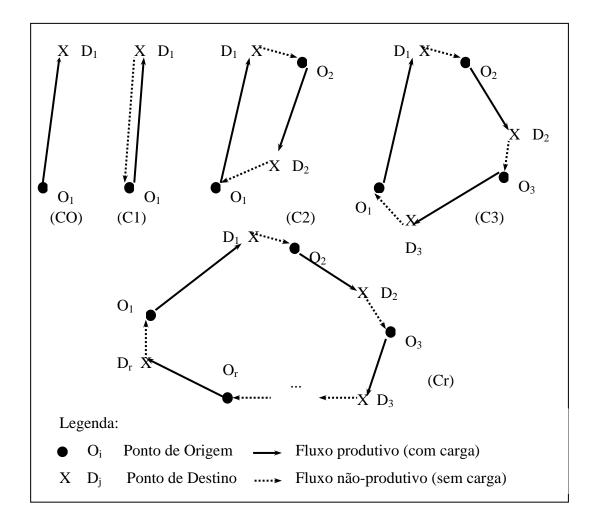


Figura 3.2 – Esquemas dos tipos de caminhos gerados

Nos esquemas temos os seguintes tipos:

- (C0) caminho com viagem direta, apenas uma origem e um destino;
- (C1) caminho com viagem direta com retorno vazio;
- (C2) caminho com combinação de arcos 2 a 2;
- (C3) caminho com combinação de arcos 3 a 3;
- (Cr) caminho com combinação de arcos r a r

3.3.1 Algoritmo do Gerador de Caminhos

O algoritmo de geração de caminhos está detalhado a seguir.

```
1- Definir parâmetros do gerador (quantidade de origens e destinos)
2- Entrar os valores das quantidades de origens e de destinos
3-Gerar a coluna com os arcos origem-destino e destino-origem:
O_iD_j (em ordem crescente de ij) e D_jO_i (em ordem crescente de ji )
Cada tipo de caminho tem seu algoritmo
4-Gerar caminhos do tipo C0: O_i => D_i
Para cada par O_iD_i
      4.1-Identificar o caminho P
      4.2-Identificar como tipo CO
      4.3-Registrar na respectiva linha do arco O_iD_j o valor 1
5-Gerar caminhos do tipo C1: O_i => D_i => Oi
Para cada par O_iD_i e D_iO_i
      5.1-Identificar o caminho P
      5.2-Identificar como tipo C1
      5.3-Registrar na respectiva linha do arco O_iD_j o valor igual a 1
      5.4-Registrar na respectiva linha do arco D_iOi o valor igual a 1
6-Gerar caminhos do tipo C2: O_{i1} => D_{j1} => O_{i2} => D_{j2} => O_{i1}
Para cada par O_{i1}D_{j1}
             Para cada par O_{i2}D_{j2}
onde, O_{i2} > O_{i1} (para evitar a formação de caminhos do tipo C1, quando
O_{i2}=O_{i1} ou a repetição de caminhos C2 que começam em outra origem do
mesmo caminho, quando O_{i2} < O_{i1})
e também D_{i1} \iff D_{i2}
(para evitar a formação de caminhos do tipo C1, quando D_{11}=D_{12})
      6.1-Identificar o caminho P
           6.2-Identificar como tipo C2
           6.3-Registrar na respectiva linha do arco O_{i1}D_{j1} o valor igual
           6.4-Registrar na respectiva linha do arco D_{j1}O_{i2} o valor igual
           6.5-Registrar na respectiva linha do arco O_{i2}D_{i2} o valor igual
           6.6-Registrar na respectiva linha do arco D_{j2}O_{i1} o valor igual
7-Gerar caminhos do tipo C3: O_{i1} \Rightarrow D_{j1} \Rightarrow O_{i2} \Rightarrow D_{j2} \Rightarrow O_{i3} \Rightarrow D_{j3} \Rightarrow O_{i1}
```

```
Para cada par O_{i1}D_{i1}
Para cada par O_{i2}D_{j2}
      onde, O_{i2} > O_{i1}
(para evitar a formação de caminhos do tipo {\it C1}, quando {\it O}_{12}{=}{\it O}_{i1} ou a
repetição de caminhos C2 que começam em outra origem do mesmo caminho,
quando O_{i2} < O_{i1})
              Para cada para O_{i3}D_{i3}
onde, O_{i3} > O_{i1} e O_{i3} <> O_{i2} ,
(para evitar a formação de caminhos do tipo C1, quando O_{13}=O_{12} ou a
repetição de caminhos C2 ou C3 que começam em outra origem do mesmo
caminho, quando O_{i3} < O_{i1})
e também, D_{j1} \iff D_{j2} , D_{j3} \iff D_{j1} e D_{j3} \iff D_{j2}
(para evitar a formação de caminhos do tipo C1 ou C2, quando D_{j1}=D_{j2} ou
D_i 3 = D_{i1} ou D_i 3 = D_{i2})
       7.1-Identificar o caminho P
       7.2-Identificar como tipo C3
           7.3-Registrar na respectiva linha do arco \mathcal{O}_{i1}\mathcal{D}_{j1} o valor igual
           7.4-Registrar na respectiva linha do arco D_{i1}O_{i2} o valor igual
           7.5-Registrar na respectiva linha do arco O_{i2}D_{i2} o valor igual
           7.6-Registrar na respectiva linha do arco D_{i2}O_{i3} o valor igual
           7.7-Registrar na respectiva linha do arco O_{i3}D_{i3} o valor igual
           7.8-Registrar na respectiva linha do arco D_{i3}O_{i1} o valor igual
                 a 1
```

Para facilitar a verificação do algoritmo e a análise dos resultados foi desenvolvida uma rotina para desenho de todos os tipos de caminhos.

Fim.

Uma das questões que surge na geração de caminhos é a pré-determinação da quantidade de caminhos possíveis, como forma de antever a viabilidade e o grau de complexidade do problema. E para isto, é preciso conhecer a regra de formação de caminhos, que a análise combinatória permitiu encontrar.

Segundo BARBOSA (1963), o Arranjo é qualquer subconjunto de objetos ou eventos em que a ordem interna é significativa. A formação dos arranjos é feita tomando-se subconjuntos de r elementos e depois fazendo-se permutações em cada subconjunto. Pode-se, para facilitar este cálculo, fazer uma operação que leva os n elementos do conjunto a ocupar r posições ordenadas nos subconjuntos.

Temos:

n é o número inteiro que descreve o número de objetos; (por exemplo: quantidade de origens ou destinos).

r é o número inteiro que descreve o número de objetos em cada permutação; (por exemplo: quantidade de caminhos sendo conjugados, isto é, para caminhos do tipo C3, o r é igual a 3).

O cálculo para determinar o número de arranjos esta representado na equação (5):

$$A_{n,r} = \frac{n!}{(n-r)!} \tag{5}$$

A Regra de Formação de Caminhos segue o produto de dois arranjos, um de origens e outro de destinos. Com uma particularidade no caso das origens, onde existe uma limitação do número de arranjos gerados, pois nem toda variação na ordem das origens gera necessariamente um novo caminho.

Pode-se demonstrar isto através de um caminho genérico do tipo C_r , onde r representa a quantidade de caminhos conjugados: $O_1D_1 - O_2D_2 - O_3D_3 - ... - O_rD_r$.

Este mesmo caminho, de acordo com a definição de arranjo formaria novos caminhos caso a ordem das origens fosse alterada, entretanto, alguns arranjos geram na verdade o mesmo caminho com início em origens diferentes.

Exemplos:

$$O_2D_2 - O_3D_3 - \dots - O_rD_r - O_1D_1$$

 $O_3D_3 - \dots - O_rD_r - O_1D_1 - O_2D_2$
 \vdots
 $O_rD_r - O_1D_1 - O_2D_2 - \dots - O_{r-1}D_{r-1}$

Com este exemplo, identifica-se um número de repetições de caminhos gerados igual a r, no caso das origens. Isto não ocorre com os destinos, onde cada novo arranjo de destinos gera um caminho diferente.

Portanto, a Regra Geral de Formação de Caminhos pode ser escrita como mostrado na equação (6)

Quantidade de Caminhos do Tipo C r =
$$\left(\frac{1}{r}\right) * A_{I,r} * A_{J,r}$$
 (6)

onde,

I = quantidade de origens na rede de distribuição, e

J = quantidade de destinos na rede de distribuição.

Na Tabela 3.2 são mostrados os Resultados do Gerador de Caminhos para várias quantidades de origens e 10 destinos e na Tabela 3.3 com 100 destinos. Estes exemplos comprovam a taxa de crescimento exponencial da quantidade de caminhos possíveis, conforme a quantidade de origens e destinos da rede de distribuição. Na Figura 3.3 são mostrados os resultados gráficos das duas Tabelas em Base Logarítmica.

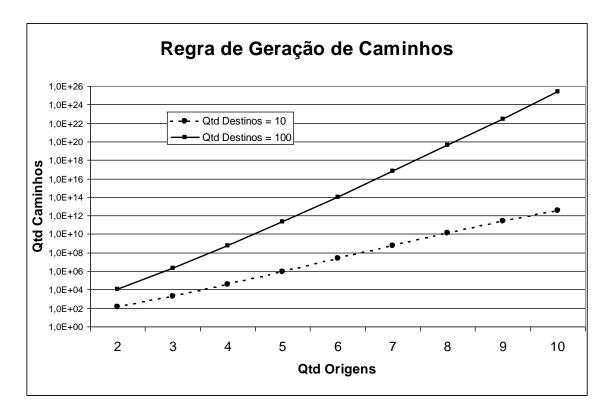


Figura 3.3 - Gráfico da Regra de Geração de Caminhos com todos os tipos disponíveis

Tabela 3.2 - Resultados do Gerador de Caminhos com várias origens e 10 destinos

1 abcia 5.2 - Kcs	abela 3.2 - Resultados do Gerador de Caminnos com varias origens e 10 destinos										
	REGRA DE GERAÇÃO DE CAMINHOS										
Parâmetros:	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)		
Origens	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Destinos	10	10	10	10	10	10	10	10	10		
Resultados:	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)		
caminhos C0	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
caminhos C1	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
caminhos C2	90	270	540	900	1.350	1.890	2.520	3.240	4.050		
caminhos C3		1.440	5.760	14.400	28.800	50.400	80.640	120.960	172.800		
caminhos C4			30.240	151.200	453.600	1.058.400	2.116.800	3.810.240	6.350.400		
caminhos C5				725.760	4.354.560	15.240.960	40.642.560	91.445.760	182.891.520		
caminhos C6					18.144.000	127.008.000	508.032.000	1.524.096.000	3.810.240.000		
caminhos C7						435.456.000	3.483.648.000	15.676.416.000	52.254.720.000		
caminhos C8							9.144.576.000	82.301.184.000	411.505.920.000		
caminhos C9								146.313.216.000	1.463.132.160.000		
caminhos C10									1.316.818.944.000		
Total	130	1.770	36.620	892.360	22.982.430	578.815.790	13.179.098.680	245.910.292.380	3.247.711.402.970		

Tabela 3.3 - Resultado do Gerador de Caminhos com várias origens e 100 destinos

REGRA DE GERA	REGRA DE GERAÇÃO DE CAMINHOS										
Parâmetros:	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)					
Origens	2	3	4	5	6	7					
Destinos	100	100	100	100	100	100					
Resultados:	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)					
caminhos C0	200	300	400	500	600	700					
caminhos C1	200	300	400	500	600	700					
caminhos C2	9.900	29.700	59.400	99.000	148.500	207.900					
caminhos C3		1.940.400	7.761.600	19.404.000	38.808.000	67.914.000					
caminhos C4			564.656.400	2.823.282.000	8.469.846.000	19.762.974.000					
caminhos C5				216.828.057.600	1.300.968.345.600	4.553.389.209.600					
caminhos C6					102.993.327.360.000	720.953.291.520.000					
caminhos C7						58.088.236.631.040.000					
caminhos C8											
caminhos C9											
caminhos C10											
Total	10.300	1.970.700	572.478.200	219.670.843.600	104.302.804.509.300	58.813.763.142.866.900					

Tabela 3.4 Cont.- Resultado do Gerador de Caminhos com várias origens e 100 destinos

REGRA DE GER	REGRA DE GERAÇÃO DE CAMINHOS									
Parâmetros:	ros: Qtd (unid) Qtd (unid		Qtd (unid)							
Origens	8	9	10							
Destinos	100	100	100							
Resultados:	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)							
caminhos C0	800	900	1.000							
caminhos C1	800	900	1.000							
caminhos C2	277.200	356.400	445.500							
caminhos C3	108.662.400	162.993.600	232.848.000							
caminhos C4	39.525.948.000	71.146.706.400	118.577.844.000							
caminhos C5	12.142.371.225.600	27.320.335.257.600	54.640.670.515.200							
caminhos C6	2.883.813.166.080.000	8.651.439.498.240.000	21.628.598.745.600.000							
caminhos C7	464.705.893.048.320.000	2.091.176.518.717.440.000	6.970.588.395.724.800.000							
caminhos C8	37.815.442.046.807.000.000	340.338.978.421.263.000.000	1.701.694.892.106.320.000.000							
caminhos C9		27.832.165.346.450.000.000.000	278.321.653.464.500.000.000.000							
caminhos C10			22.794.543.418.742.500.000.000.000							
Total	38.283.043.935.027.600.000	28.174.604.180.221.100.000.000	23.074.573.759.370.900.000.000.000							

Obs.: O Software © Microsoft Excel faz contas com no máximo 15 algarismos significativos.

29

Outra informação importante, que se extrai desses exemplos, é o limite máximo de conjugação de rotas ou tipos de caminhos que podem ser utilizados na aplicação da metodologia numa rede de distribuição.

Esse Limite Máximo de Tipos de Caminhos (r_{max}) é dado pela equação (7)

$$\gamma_{\max} = Min(I;J) \tag{7}$$

onde,

I =quantidade total de origens;

J = quantidade total de destinos.

Este equação mostra, por exemplo, que numa rede com 4 origens e 10 destinos pode-se utilizar no máximo caminhos do Tipo C4. Portanto, para esta rede, os tipo disponíveis para a aplicação da metodologia são C0, C1, C2, C3 e C4.

Outra questão que surge é a da garantia da conectividade, que significa evitar que novos caminhos sejam gerados como simples combinações de caminhos gerados anteriormente. Como exemplo, tem-se um caminho do tipo *C*3 que poderia ser a combinação um caminho do tipo *C*2 com outro do tipo *C*1.

A forma encontrada para garantir essa conectividade no gerador de caminhos, foi introduzir no algoritmo as restrições de que em cada caminho, nem a origem e nem o destino poderiam se repetir.

3.4 Calculador de Custos para os Caminhos

O Custeador de Caminhos foi baseado no cenário econômico do transporte de carga completa, sendo que a função de custo tem um componente fixo e outro variável.

Notação Utilizada

 C_P Custo do Caminho p

*CF*_{mensal} Custo Fixo Mensal

CF_P Custo Fixo do Caminho *p*

CN Cenário - Rede de Distribuição + Cenário Econômico

CV Custo Variável em R\$/km rodado

DM Demanda de Viagens no arco

 DT_P Distância Total percorrida pelo Caminho p

 Q_{ciclos} Quantidade de Ciclos ou Viagens por mês

 T_{buscaP} Tempo de Busca ou Tempo para a próxima carga do Caminho p

 T_{cargaP} Tempo de Carga do Caminho p

 $T_{descargaP}$ Tempo de Descarga do Caminho p

TC_P Tempo de Ciclo ou Viagem do Caminho *p*

 TP_P Tempo Parado do Caminho p. Soma dos Tempos de carga/descarga/busca

 TR_P Tempo Rodado do Caminho p

TT_{mensal} Tempo Total Disponível por mês

VM Velocidade Média em km/h

O custo total do caminho, equação (8), é a soma de uma parcela fixa com a parcela variável multiplicada pela distância total percorrida no caminho p.

$$C_{P} = CF_{P} + CV * DT_{P} \tag{8}$$

O custo fixo do caminho p, equação (9), é a parcela equivalente ao custo fixo mensal do equipamento para um ciclo do caminho, isto é, um viagem fechada do caminho.

$$CF_P = CF_{mensal} / Q_{ciclos}$$
 (9)

A Quantidade de Ciclos no mês, equação (10), é o quociente do Tempo Total disponível para o equipamento no mês sobre o Tempo de Ciclo do caminho p.

$$Q_{ciclos} = TT_{mensal} / TC_{P}$$

$$(10)$$

O Tempo de Ciclo do caminho p, equação (11), é a soma dos tempos rodante e os tempos parados.

$$TC_P = TR_P + TP_P \tag{11}$$

O Tempo Rodante do caminho p, equação (12), é quociente entre a distância total percorrida no caminho p a velocidade média do equipamento.

$$TR_{P} = DT_{P}/VM \tag{12}$$

O Tempo Parado do caminho p, equação (13), é a soma dos tempos de carga, descarga e busca de nova carga.

$$TP_{P} = T_{cargaP} + T_{descargaP} + T_{buscaP}$$
 (13)

Neste custeador de caminhos o CV, a DT_P , o TT_{mensal} , a VM e os tempos T_{cargaP} , $T_{descargaP}$, T_{buscaP} são dados.

Com esse cenário econômico, os custos das viagens foram calculados para dois grupos de tipos de caminho. O primeiro grupo, composto por caminhos do tipo *C*1, *C*2, *C*3,*Cr* a aplicação do modelo é direta, com tempo de busca igual a zero, pois se tratam de caminhos com frota dedicada.

No segundo grupo, o dos caminhos do tipo CO (spot), os custos são calculados seguindo o modelo tipo CI, com viagens de ida e volta, mas com duas particularidades:

- Tempo de ciclo (TC_P) é calculado com os T_{cargaP} e $T_{descargaP}$ duplicados em relação ao CI equivalente e com o T_{buscaP} não nulo, pois o veículo terá que buscar nova carga para retornar à origem inicial;
- Custo da viagem de um caminho C0 é uma parcela do custo do caminho C1
 equivalente, pois a segunda parte do caminho será de responsabilidade de
 outro embarcador.

3.4.1 Algoritmo do Custeador de Caminhos

O algoritmo de custeador de caminhos está detalhado a seguir.

```
1- Definir parâmetros do custeador (CF_{mensal}, CV, matriz de distâncias origem/destino, T_{carga}, T_{descarga}, T_{busca}, VM, TT_{mensal});
2- Entrar os valores dos parâmetros;
3-Existem dois tipos de cálculo para o custeador de caminhos: spot e frota dedicada;
4- Custear caminhos do tipo C0: O_i => D_j (spot)
Para cada caminho p gerado
4.1-Calcular a distância total de p (DT_P);
4.2-Calcular o tempo de ciclo (TC_P), conforme equações (13), (12) e (11);
4.3-Calcular a quantidade de ciclos (Q_{ciclos}), conforme equação (10);
```

```
4.4-Calcular o custo da viagem completa (ida e volta), conforme equações (9) e (8);
4.5-Calcular o custo da viagem CO, como 50% do custo da viagem completa;
5- Custear caminhos do tipo C1, C2 e C3 (frota dedicada);
Para cada caminho p gerado
5.1-Calcular a distância total de p (DT<sub>P</sub>);
5.2-Calcular o tempo de ciclo (TC<sub>P</sub>), conforme equações (13), (12) e (11);
5.3-Calcular a quantidade de ciclos (Q<sub>ciclos</sub>), conforme equação (10);
5.4-Calcular o custo da viagem completa, conforme equações (9) e (8)
```

Como exemplo de cenário econômico está apresentado na Tabela 3.5 o cenário econômico 1 (CE1) utilizado nos casos testes desenvolvidos no Capítulo 4. Este cenário econômico é precedido pelo CE0 com custo fixo maior, e seguido pelos CE2 e CE3, que apresentam custos fixos menores. Esse conjunto de cenários econômicos servirá de base para uma análise de sensibilidade.

Nos casos das viagens de curtas distâncias, a frota dedicada é mais competitiva, pois o giro da frota é proporcionalmente mais importante do que esperar a carga de retorno. Este contraponto entre custos de viagens C0 e C1 mostrado na Tabela 3.5 está exemplificado na Figura 3.4.

Tabela 3.5 - Cenário Econômico CE 1

CENÁRIOS ECON	ÔMICO (C	E1)	
Parâmetro	Valor	Unidade	Obs:
Custo Fixo Mensal	10.000,00	R\$/mês	Considera as parcelas de remuneração de capital, salário do motorista, salário oficina, reposição do veículo, reposição carroceria, licenciamento, seguro casco do veículo, seguro do equipamento, seguro de responsabilidade civil facultativa
Custo Variável	1,00	R\$/Km	Peças, acessórios e materiais de manutenção, combustível, lubrificantes, lavagem/lubrificação e pneus
Tempo Total	200	h/mês	Tempo Total disponível do equipamento/motorista para operações de carga, descarga, busca e transporte. (total de 220 h/mês descontadas de 20 h para paradas técnicas ou manutenção)
Velocidade Média	50	Km/h	Média Considerada para percursos com trechos urbanos e rodoviários
Tcarga	4	h	Tempo médio que inclui todos os processos administrativos, burocráticos e de operação
Tdescarga	4	h	Tempo médio que inclui todos os processos administrativos, burocráticos e de operação
Tbusca	20	h	Tempo médio para identificação de carga de retorno no caminho C0
Parcela de C1 paga para fazer apenas C0 (spot)	50%	%	Parcela do custo do caminho C1, que tem Tbusca > 0 e Tcarga e Tdescarga dobrados.
Distância Máxima para <i>C</i> 1 < <i>C</i> 0	250	km	Distância até a qual compensa dedicar a frota com caminhos C1, pois o tempo perdido é mais importante do que aguardar o retorno.

Fonte: Adaptada de TACLA (1999)

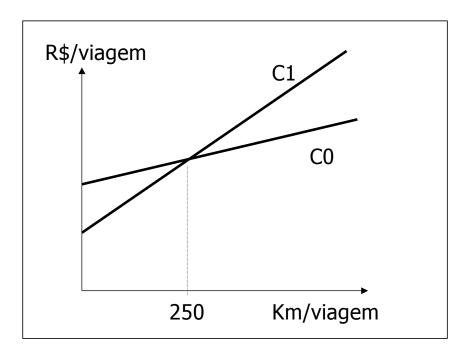


Figura 3.4 - Gráfico do Custo Viagem C0 x C1

Quando do desenvolvimento deste Custeador de Caminhos, três pontos chamaram a atenção:

- a) O tempo de busca é fator crítico para definir a competitividade da frota dedicada quando comparada a frota *spot*. E seu valor na prática varia com a região, com o período do ano e do mês. Para o custeador, entretanto, foi considerado um valor uniforme equivalente a dois dias;
- b) Mesmo com frota dedicada, é necessário conhecer o tempo até a próxima atividade do veículo, que pode variar conforme as requisições de transporte. No custeador, como se está num nível de decisão mais estratégico do que operacional, se considera que os processos operacionais são adaptados para garantir o aproveitamento da frota. Portanto, o tempo para a próxima atividade coincide com o deslocamento do veículo do último destino até a próxima origem;
- c) Caso exista tempo ocioso, qual dos envolvidos arcará com o custo fixo?

Neste caso, o modelo de remuneração negociado entre o embarcador e o transportador irá responder esta questão. Mas como indicado no Capítulo 1, a oportunidade de reduzir o custo do transporte está na redução da incerteza sobre o próximo carregamento. E para não ter esta oportunidade reduzida, recomenda-se que a remuneração da frota dedicada envolva o custo fixo mensal acrescido do custo variável pela distância.

3.5 Modelo Matemático de Programação Linear Inteira

O modelo de Programação Linear Inteira desenvolvido neste trabalho está baseado no CACB (*Carrier Assignment Model with Condicional Bids*) de CAPLICE; SHEFFI (2003) e minimiza a função de custo total de transporte numa rede de distribuição.

Função Objetivo:

$$Min\ CT = \sum_{p} C_{p} * X_{p} \tag{14}$$

Sujeito a:

Atendimento da demanda exata de viagens nos arcos

$$\sum_{p} \delta_{p}^{ij} * X_{p} = DM_{ij}, \forall ij$$
 (15)

A quantidade de viagens no caminho p deve ser um número inteiro e positivo

$$X_{p} \in N \tag{16}$$

Onde:

i: local de origem

j: local de destino

p: caminho formado de arcos ij e ji

Variáveis de Decisão:

 X_p : quantidade de viagens no caminho p

Dados:

 δ_p^{ij} : número binário, que define se o arco O_iD_j pertence ao caminho p

$$\mathcal{S}_{p}^{ij} = [0,1], \forall ij \tag{17}$$

 C_p : Custo unitário de uma viagem no caminho p (custeador de caminhos).

 DM_{ij} : Demanda em número de viagens do arco ij.

3.6 Análise de Sensibilidade

A Análise de Sensibilidade de um modelo matemático mostra o impacto no resultado final com a introdução de variações nos parâmetros de entrada. Estes resultados permitem determinar quão robusta é a solução perante variações que podem ser inerentes aos processos.

Neste trabalho, a Análise de Sensibilidade se baseará em três frentes, selecionadas para identificar a contribuição de cada tipo de caminho na solução ótima, a variação do resultado perante outros custos de operação, bem como com demanda não balanceada:

- 1^a Análise de Sensibilidade com relação às combinações de tipos de caminhos disponíveis para a solução;
- 2ª Análise de Sensibilidade com relação aos parâmetros do modelo econômico do transporte de carga lotação, isto é, nas parcelas de custo fixo mensal e custo variável por quilômetro;
- 3^a Análise de Sensibilidade com relação à demanda, onde ao invés de rotas com a mesma demanda, será feita a análise com demandas aleatórias (distribuição uniforme).

Neste capítulo foi desenvolvida toda a metodologia para a Designação de Rotas para Frota Dedicada, incluindo:

- a) Gerador de Caminhos;
- b) Custeador de Caminhos;
- c) Modelo de Programação Linear Inteira;
- d) Análise de Sensibilidade do Modelo.

O modelo de programação poderia ser desenvolvido de outra maneira, com as variáveis de decisão não lineares, entretanto, o esforço computacional cresceria exponencialmente

Antes de ser aplicada numa Rede de Distribuição de Linha Branca, esta metodologia será aplicada numa série de casos-teste para sua exploração e validação.

4 APLICAÇÃO EM CASOS-TESTE

Neste capítulo é mostrada a validação da metodologia com a aplicação de vários casosteste, em pequena escala, onde os resultados obtidos e a análise de sensibilidade são desenvolvidos para posterior aplicação em uma rede de distribuição de linha branca.

A motivação para escolha das Redes de Distribuição destes casos-teste está no fato de serem simples e permitirem, além de uma análise mais detalhada dos resultados, mostrar todos os tipos de caminhos conjugados até o nível *C*5. Parou-se nesse nível pois a Rede de Distribuição de Linha Branca considerada neste trabalho tem no máximo 4 origens.

Todas as Redes de Distribuição foram montadas com 200 km de distância entre as origens mais próximas e 50 km entre as origens e destinos mais próximos. Isto em função do cenário econômico utilizado como referência, o CE1, onde até 250 km de distância os caminhos C1 apresentam custo menor do que os C0 equivalentes, conforme Tabela 3.5. Espera-se destas redes que os caminhos de nível superior a C0 sejam utilizados com maior intensidade, podendo inclusive, substituí-los totalmente.

4.1 Escopo e Parâmetros dos Casos-Teste

Para a validação da metodologia e do modelo foram desenvolvidos seis (6) cenários baseados em seis (6) redes de distribuição e quatro (4) cenários econômicos. Todos seguem as mesmas hipóteses de:

- Frota Homogênea;
- Utilização de um motorista por equipamento;
- Cargas completas (uma origem e um destino, sem necessariamente 100% de ocupação do veículo na viagem);
- Demandas nos arcos em viagens inteiras;
- Unidade das variáveis de decisão em viagens por arco.

Admite-se que estas redes de distribuição teóricas sejam atendidas atualmente por viagens diretas do tipo C0, com frotas não dedicadas, ou seja, com viagens *spot*.

Nas figuras a seguir são representadas as seis (6) redes de distribuição desenvolvidas como casos limites para o teste do modelo.

A Rede de Distribuição 1 (RD1), representada na Figura 4.1, com três (3) origens equidistantes e três (3) destinos colocados externamente, tem sua matriz de distância origem/destino na

Tabela 4.1.

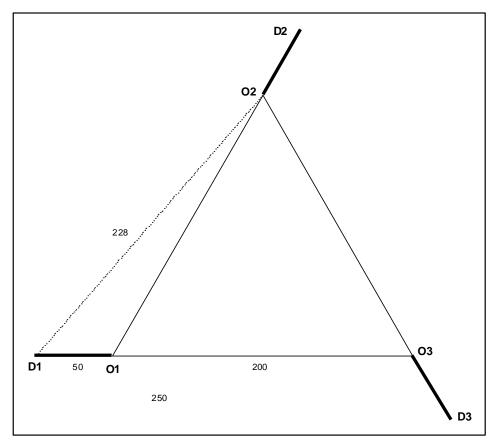


Figura 4.1 - Rede de Distribuição RD1 com 3 origens e 3 destinos Externos

Tabela 4.1 - Matriz Distância Origem/Destino RD1 (em km)

	D1	D2	D3
01	50	250	228
O2	228	50	250
O3	250	228	50

A Rede de Distribuição 2 (RD2), representada na Figura 4.2, com três (3) origens equidistantes e três (3) destinos colocados internamente, tem sua matriz de distância origem/destino na Tabela 4.2.

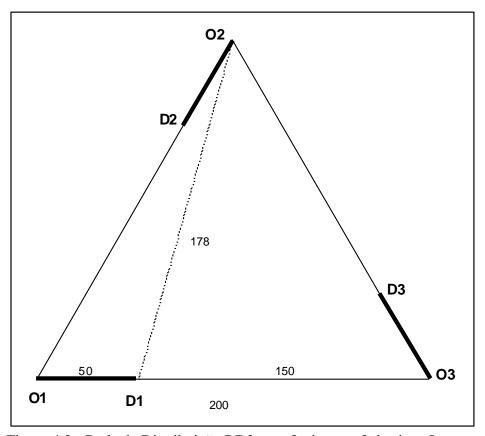


Figura 4.2 - Rede de Distribuição RD2 com 3origens e 3 destinos Internos

Tabela 4.2 - Matriz Distância Origem/Destino RD2 (em km)

	D1 D2		D3
01	50	150	178
O2	178	50	150
O3	150	178	50

A Rede de Distribuição 3 (RD3), representada na Figura 4.3, com quatro (4) origens equidistantes e quatro (4) destinos colocados externamente, tem sua matriz de distância origem/destino na Tabela 4.3.

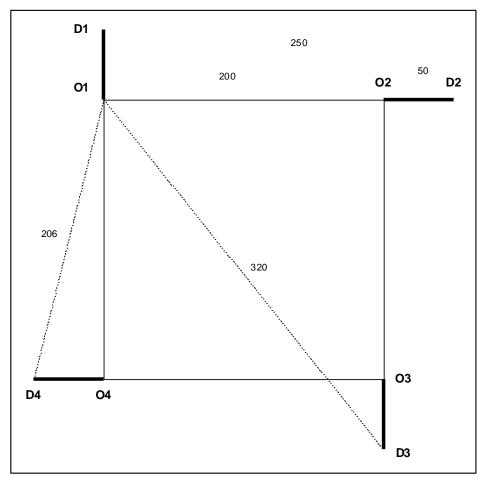


Figura 4.3 - Rede de Distribuição RD3 com 4 origens e 4 destinos Externos

Tabela 4.3 - Matriz Distância Origem/Destino RD3 (em km)

	D1	D2	D3	D4
O1	50	250	320	206
O2	206	50	250	320
O3	320	206	50	250
O4	250	320	206	50

A Rede de Distribuição 4 (RD4), representada na Figura 4.4, com quatro (4) origens equidistantes e quatro (4) destinos colocados internamente, tem sua matriz de distância origem/destino na Tabela 4.4.

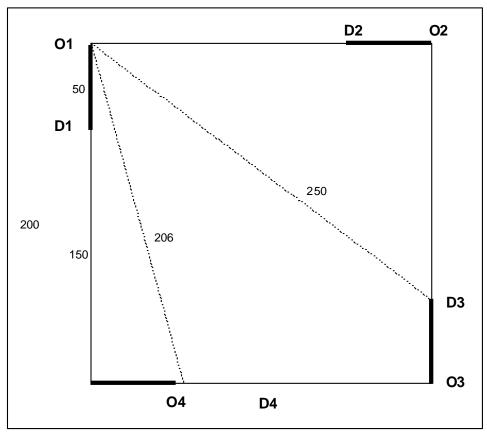


Figura 4.4 - Rede de Distribuição RD4 com 4 origens e 4 destinos Internos

Tabela 4.4 - Matriz Distância Origem/Destino RD4 (em km)

	D1	D2	D3	D4
O1	50	150	250	206
O2	206	50	150	250
O3	250	206	50	150
O4	150	250	206	50

A Rede de Distribuição 5 (RD5), representada na Figura 4.5, com cinco (5) origens equidistantes e cinco (5) destinos colocados externamente, tem sua matriz de distância origem/destino na Tabela 4.5.

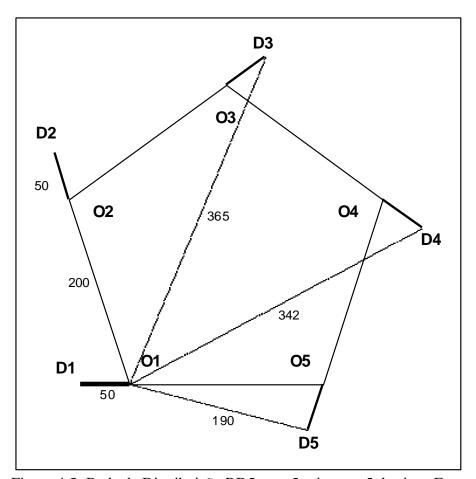


Figura 4.5- Rede de Distribuição RD5 com 5 origens e 5 destinos Externos

Tabela 4.5 - Matriz Distância Origem/Destino RD5 (em km)

	D1	D2	D3	D4	D5
01	50	250	365	342	190
O2	190	50	250	365	342
O3	342	190	50	250	365
O4	365	342	190	50	250
O5	250	365	342	190	50

A Rede de Distribuição 6 (RD6), representada na Figura 4.6, com cinco (5) origens equidistantes e cinco (5) destinos colocados internamente, tem sua matriz de distância origem/destino na Tabela 4.6.

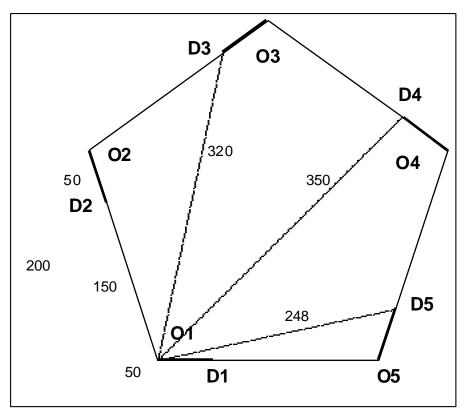


Figura 4.6 - Rede de Distribuição RD5 com 5 origens e 5 destinos Internos

Tabela 4.6 - Matriz Distância Origem/Destino RD6 (em km)

	D1	D2	D3	D4	D5	
01	50	150	320	350	248	
O2	248	50	150	320	350	
О3	350	248	50	150	320	
O4	320	350	248	50	150	
O5	150	320	350	248	50	

4.2 Aplicação do Gerador de Caminhos nos Casos-Teste

A Aplicação do Gerador de Caminhos apresentou os resultados previstos pela regra de formação mostrada na equação (2) do item 3.3 deste trabalho.

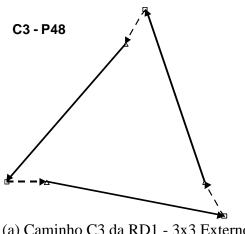
A Tabela 4.7 identifica a quantidade de caminhos gerados para cada tipo de caminho de C0 até C5.

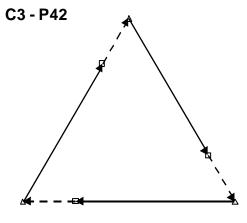
Tabela 4.7 - Resultado do Gerador de Caminhos para Caso Teste

REG	REGRA DE GERAÇÃO DE CAMINHOS										
Parâmetros:	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)								
Origens	3	4	5								
Destinos	3	4	5								
Resultados:	Qtd (unid)	Qtd (unid)	Qtd (unid)								
caminhos C0	9	16	25								
caminhos C1	9	16	25								
caminhos C2	18	72	200								
caminhos C3	12	192	1.200								
caminhos C4		144	3.600								
caminhos C5			2.880								
Total	48	296	7.930								

Nas Redes de Distribuição de 3x3 (origens x destinos) têm-se 48 caminhos p possíveis, ao invés dos 9 caminhos C0, que por hipótese atendem a demanda atual. As Redes 4x4 apresentam 296 caminhos p, ao invés dos 16 caminhos C0 atuais. E as Redes 5x5 apresentam 7.930 caminhos p, ao invés dos 25 caminhos C0 atuais.

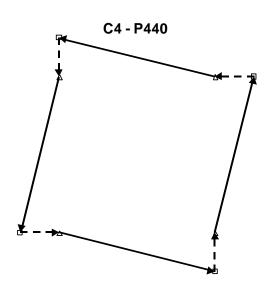
Na Figura 4.7 são mostrados exemplos de desenhos de rotas geradas com base nas Redes de Distribuição 3x3, 4x4 e 5x5 externas e internas.

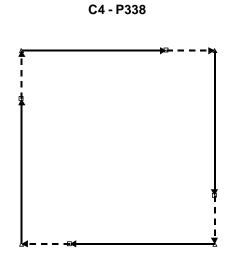




(a) Caminho C3 da RD1 - 3x3 Externo

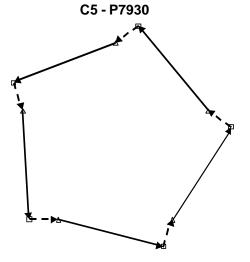


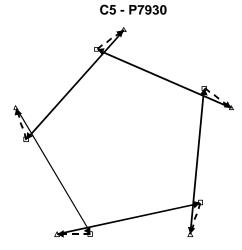




(c) Caminho C3 da RD3 - 4x4 Externo

(d) Caminho C4 da RD4- 4x4 Interno





(e) Caminho C5 da RD5 - 5x5 Externo

(f) Caminho C5 da RD6- 5x5 Interno

Figura 4.7 - Desenho das Rotas Geradas (Exemplos)

4.3 Aplicação do Custeador de Caminhos nos Casos-Teste

Na aplicação do Custeador de Caminhos foram utilizados os resultados do gerador de caminhos e um cenário econômico chamado CE1, sendo que seus parâmetros estão descritos na Tabela 3.5.

Os cenários (CN) são compostos de Redes de Distribuição (RD) e Cenários Econômicos (CE). Como exemplo, tem-se o Cenário 11 (CN11) da Tabela 4.8, que é composto da RD1 e do CE1.

Os resultados dos custos de caminhos podem ser resumidos na Tabela 4.8, onde para cada cenário (CN) se comparam a quantidade total de caminhos gerados com a quantidade daqueles com custos menores do que a soma dos respectivos caminhos CO que os formam. Esta comparação de custo serviu de filtro para os caminhos gerados em TACLA (2003).

Tabela 4.8 - Resultado do Custeador de Caminhos - Casos-Teste

	Resultado do Custeador de Caminhos											
Qtd de Caminhos	CN11 3 x 3 externo		CN21 3 x 3 interno		CN31 4 x 4 externo		CN41 4 x 4 interno		CN51 5 x 5 externo		CN61 5 x 5 interno	
Carriii	Α	В	Α	В	Α	В	Α	В	Α	В	Α	В
caminhos C0	9	9	9	9	16	16	16	16	25	25	25	25
caminhos C1	9	9	9	9	16	16	16	16	25	25	25	25
caminhos C2	18	18	18	18	72	50	72	72	200	105	200	135
caminhos C3	12	12	12	12	192	140	192	192	1.200	635	1.200	820
caminhos C4					144	114	144	144	3.600	2.035	3.600	2.455
caminhos C5									2.880	1.631	2.880	1.942
Total	48	48	48	48	440	336	440	440	7.930	4.456	7.930	5.402
% B/A		100%		100%		76%		100%		56%		68%

LEGENDA

Α	Qtd de Caminhos Gerados (unid)
В	Qtd Caminhos com Custo Menor que os caminhos C0 equivalentes (unid)

47

Neste caso, como as Redes de Distribuição RD1, RD3 e RD5 têm destinos posicionados externamente à figura formada pelas origens, é de se esperar que os caminhos dos tipos C1, C2, C3, C4 e C5 apresentem menor número de caminhos mais baratos que seus respectivos caminhos C0, quando comparados com as Redes de Distribuição de RD2, RD4 e RD6. Nestas últimas, os destinos estão posicionados internamente, o que faz com que as distâncias dos arcos sejam menores.

Os resultados apresentados pelo Custeador de Caminhos estão aderentes à realidade, e imagina-se, apto para aplicação à Rede de Distribuição de Linha Branca, objetivo do trabalho.

4.4 Resultados do Modelo Matemático do Caso Teste

Os resultados do Caso Teste foram detalhados para cada um dos seis (6) Cenários desenvolvidos, sendo eles formados por seis (6) redes de distribuição (RD) com um cenário econômico (CE).

Cenário CN11 (RD1 e CE1); Cenário CN21 (RD2 e CE1); Cenário CN31 (RD3 e CE1); Cenário CN41 (RD4 e CE1); Cenário CN51 (RD5 e CE1); Cenário CN61 (RD6 e CE1);

Como dados de entrada para o modelo de programação linear inteira, além dos resultados dos processos de Geração de Caminhos e de Cálculo de Custos, foi considerada uma demanda balanceada, isto é, para cada arco origem/destino a demanda foi de 1.000 viagens/ano.

Tabela 4.9 - Resultados do Modelo Matemático- Custos de Transporte nos Cenários

Custo de Transporte (R\$/ano)						
	CN11 3 x 3 externo	CN21 3 x 3 interno	CN31 4 x 4 externo	CN41 4 x 4 interno	CN51 5 x 5 externo	CN61 5 x 5 interno
Situação Básica- Resultado com C0 apenas	11.274.000,00	10.383.000,00	21.008.000,00	19.648.000,00	34.480.000,00	32.670.000,00
Situação Proposta - Resultado do Modelo com C0,C1,C2,,C <i>r</i>	7.674.000,00	6.782.000,00	14.610.000,00	13.248.000,00	24.480.000,00	22.670.000,00
Impacto no Custo	(3.600.000,00)	(3.601.000,00)	(6.398.000,00)	(6.400.000,00)	(10.000.000,00)	(10.000.000,00)
de Transporte	-31,93%	-34,68%	-30,46%	-32,57%	-29,00%	-30,61%

Os Cenários apresentaram excelentes resultados quanto à redução de custo de transporte, com reduções de 29% a 34% no custo mensal (Tabela 4.9). Embora seja um resultado teórico, já que a demanda está perfeitamente balanceada, ele confere um conhecimento sobre o potencial de redução de custo de transporte na rede de distribuição ao se utilizar a frota dedicada.

Da Tabela 4.10 à Tabela 4.15 são detalhados os resultados dos modelos matemáticos dos seis (6) Cenários formados pelas seis (6) Redes de Distribuição com o Cenário Econômico de referência, o CE1.

Estas tabelas estão organizadas para mostrar a quantidade de caminhos gerados, a quantidade de caminhos com custo menor que os caminhos C0 equivalentes, a quantidade de caminhos utilizados na solução ótima do modelo, bem como, a quantidade de viagens em cada tipo de caminho. Esta última quantidade merece um detalhamento. Quando são utilizadas 1.000 viagens em cada um de três caminhos do tipo C1, têm-se no total 3.000 viagens, enquanto as mesmas 1.000 viagens ocorrem em cada um de três caminhos do tipo C2, têm-se no total 6.000 viagens, pois a unidade de viagens utilizada está baseada nos pares origem-destino.

Tabela 4.10 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 11

RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO - CN1-1 completo D							
Parâmetros:	Q	td (unid)	Rede Distribuição	Cenário Econômico			
Origens		3	RD 1	CE 1			
Destinos		3	KD I	CL 1			
	-						
Resultados:	Qtd de Caminhos Gerados (unid)	Qtd Caminhos com custo menor que C0 (unid)	Qtd de Caminhos na Solução Ótima (unid)	Qtd de Viagens na Solução Ótima			
caminhos C0	9	9	0	0			
caminhos C1	9	9	3	3.000			
caminhos C2	18	18	3	6.000			
caminhos C3	12 12		0	0			
Total	48	48	6	9.000			

Tabela 4.11 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 21

RE	SULTADOS DO MOD	DELO MATEMÁTICO	O - CN2-1 comple	to D	
Parâmetros:	Qtd	Qtd (unid)		Cenário Econômico	
Origens		3		CE 1	
Destinos		3		GE 1	
Resultados:	Qtd de Caminhos Gerados (unid)	Qtd Caminhos com custo menor que C0 (unid)	Qtd de Caminhos na Solução Ótima (unid)	Qtd de Viagens na Solução Ótima	
caminhos C0	9	9	0	0	
caminhos C1	9	9	3	3.000	
caminhos C2	18	18	0	0	
caminhos C3	12	12	2	6.000	
Total	48	48	5	9.000	

Tabela 4.12 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 31

RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO - CN3-1 completo D							
Parâmetros:	Qtd	Qtd (unid)		Cenário Econômico			
Origens		4		CE 1			
Destinos	4		RD 3	CE 1			
Resultados:	Qtd de Caminhos Gerados (unid)	Qtd Caminhos com custo menor que C0 (unid)	Qtd de Caminhos na Solução Ótima (unid)				
caminhos C0	16	16	0	0			
caminhos C1	16	16	4	4.000			
caminhos C2	72	50	6	12.000			
caminhos C3	192	140	0	0			
caminhos C4	144	114	0	0			
Total	440	336	10	16.000			

Tabela 4.13 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 41

RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO - CN4-1 completo D						
Parâmetros:	Qtd	(unid)	Rede Distribuição	Cenário Econômico		
Origens		4		CE 1		
Destinos		4		OL 1		
Resultados:	Qtd de Caminhos Gerados (unid)	Qtd Caminhos com custo menor que C0 (unid)	Qtd de Caminhos na Solução Ótima (unid)	Qtd de Viagens na Solução Ótima		
caminhos C0	16	16	0	0		
caminhos C1	16	16	4	4.000		
caminhos C2	72	72	6	12.000		
caminhos C3	192	192	0	0		
caminhos C4	144	144	0	0		
Total	440	440	10	16.000		

Tabela 4.14 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 51

RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO - CN5-1 completo D						
Parâmetros:		Q	td (unid)	Rede Distribuição	Cenário Econômico	
Origens		5		RD 5	CE 1	
Destinos			5	KD 3	OL 1	
Resultados:		Qtd de Caminhos Gerados (unid)	Qtd Caminhos com custo menor que C0 (unid)	Qtd de Caminhos na Solução Ótima (unid)	Qtd de Viagens na Solução Ótima	
caminhos C0		25	25	0	0	
caminhos C1		25	25	5	5.000	
caminhos C2		200	105	10	20.000	
caminhos C3		1.200	635	0	0	
caminhos C4		3.600	2.035	0	0	
caminhos C5		2.880	1.631	0	0	
Total		7.930	4.456	15	25.000	

Tabela 4.15 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 61

RESU	JLTADOS DO MOD	ELO MATEMÁTICO	- CN6-1 complet	o D
Parâmetros:	Q	td (unid)	Rede Distribuição	Cenário Econômico
Origens		5		CE 1
Destinos		5	RD 6	OE 1
Resultados:	Qtd de Caminhos Gerados (unid)	Qtd Caminhos com custo menor que C0 (unid)	Qtd de Caminhos na Solução Ótima (unid)	Qtd de Viagens na Solução Ótima
caminhos C0	25	25	0	0
caminhos C1	25	25	5	5.000
caminhos C2	200	135	3	2.500
caminhos C3	1.200	820	5	7.500
caminhos C4	3.600	2.455	7	10.000
caminhos C5	2.880	1.942	0	0
Total	7.930	5.402	20	25.000

Todos os Cenários apresentaram em comum o fato de não utilizarem os caminhos do tipo C0, isto é, toda demanda foi atendida por frota dedicada.

Nas Redes de Distribuição RD1 (Tabela 4.10) e RD2 (Tabela 4.11) com 3 origens e 3 destinos, a diferença entre os cenários está no fato da primeira utilizar caminhos do tipo C1 e C2, enquanto a segunda utilizou caminhos do tipo C1 e C3.

As Redes de Distribuição RD3 (Tabela 4.12) e RD2 (Tabela 4.13) com 4 origens e 4 destinos, apresentaram os mesmos resultados em termos de utilização de caminhos, com caminhos do tipo C1 e C2 atendendo toda a demanda.

Na Rede de Distribuição RD5 (Tabela 4.14) com 5 origens e 5 destinos externos, a utilização de caminhos C1 e C2 para atender toda a demanda, deixou de fora da solução ótima todos os caminhos C0, C3, C4 e C5.

Na Rede de Distribuição RD6 (Tabela 4.15) com 5 origens e 5 destinos internos, a utilização de tipos caminhos mostrou-se a mais completa entre todos os cenários, com caminhos do tipo C1,C2,C3 e C4 na solução ótima, concentrado nos caminhos do tipo C4 e C3. Outro fator que marcou este cenário, foi a quantidade de viagens nas rotas, que

apresentaram 250, 500 e 1.000 viagens por caminho, enquanto os demais cenários ficaram restritos a 1.000 viagens por caminho.

Para todas as instâncias, resolvendo-se o problema com a segunda restrição do modelo (quantidade de viagens de *p* inteira) relaxada, ou seja, considerando o modelo linear, obteve-se os mesmos resultados do modelo completo não relaxado (linear inteiro), poder-se-ia conjeturar que a matriz de coeficientes das restrições deve ser unimodular - PAPADIMITRIOU; STEIGLITZ (1998), pois todos os caminhos têm valores inteiros. Entretanto, veremos no Capítulo 5 que existem instâncias onde isso não ocorre.

Alem disso, como se esperava, apenas caminhos de nível superior a *C*0 entraram na solução ótima, porque os cenários foram construídos para que isso ocorresse

4.5 Análise de sensibilidade do Caso Teste

Como comentado no item 3.6 deste trabalho, a Análise de Sensibilidade se baseará em três frentes:

- 4.5.1 Análise de Sensibilidade dos Tipos de Caminhos Disponíveis;
- 4.5.2 Análise de Sensibilidade com relação aos Cenários Econômicos;
- 4.5.3 Análise de Sensibilidade da Demanda.

4.5.1 Análise de Sensibilidade dos Tipos de Caminhos Disponíveis

Nesta análise de sensibilidade são mostrados os resultados econômicos de várias alternativas de utilização de tipos de caminhos. Partindo da situação atual, com apenas frota não-dedicada, até o extremo de utilizar apenas frota dedicada com combinações de até 5 arcos nos caminhos.

Esta análise de sensibilidade foi feita para os seis (6) cenários do teste, cujos resultados são apresentados da Tabela 4.16 até a Tabela 4.21.

Estas tabelas estão organizadas para mostrar o Custo Anual de Transporte para cada instância, a economia ou resultado monetário comparada a Base Atual, o mesmo

resultado em porcentagem e finalmente, o resultado marginal, isto é, a contribuição adicional de cada instância comparada a instância anterior.

Como exemplo deste Resultado Marginal tem-se a Tabela 4.16, onde o resultado marginal da instância com caminhos do tipo C0+C1+C2 trouxe uma redução superior a 22% em relação a instância com caminhos C0+C1, perfazendo no Resultado Geral quase 32% de redução quando comparado a Base Atual.

Da Figura 4.8 até Figura 4.13 estão representados graficamente a distribuição do Custo Fixo e Custo Variável no Transporte.

Nestas análises de Custo Fixo e Custo Variável, o cenário econômico tem o custo variável igual a R\$1,00/km, e portanto, pode-se comparar diretamente a distância percorrida entre os modelos e o custo total do transporte.

Na Figura 4.8, onde no cenário CN11 toda a demanda de viagens é atendida por caminhos do tipo C0 (frota *spot*) na Base Atual, têm-se 1.584 mil km/ano sendo percorridos entre as origens e os destinos. Quando se observa a disponibilidade de frota dedicada (caminhos tipo C1, C2 e C3) o custo variável cresce significativamente, pois a distância percorrida cresce quando a frota dedicada se reposiciona dos destinos para as próximas origens (percorrendo 2.918 mil km/ano com caminhos C0+C1 e 2.034 mil km/ano com caminhos C0+C1+C2). Entretanto, o Custo Total de Transporte tem redução significativa, já que a redução do Custo Fixo mais do que compensou esta maior distância percorrida.

O Custo Fixo, por sua vez, é reduzido pelo aumento da produtividade ao se eliminar o tempo de busca de novas cargas.

Tabela 4.16 - Resultado da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN11

RESULTAD	OS DA ANÁLI	ISE DE SENSIBILI	DADE - CN1-1 con	npleto D
Parâmetros:	Qtd (unid)		Rede Distribuição	Cenário Econômico
Origens		3	RD 1	CE 1
Destinos		3	ND 1	OL 1
Alternativas	Custo	Resultado	Resultado	Resultado Marginal
	Transporte	sobre a	sobre a	(diferença em
	(R\$/ano)	Base Atual	Base Atual	relação a instância
		(R\$/ano)	(%)	anterior)
C0 (Base Atual)	11.274.000			
C0+C1	9.951.000	-1.323.000	-11,73%	-11,73%
C0+C1+C2	7.674.000	-3.600.000	-31,93%	-22,88%
C0+C1+C2+C3 (CN1-1)	7.674.000	-3.600.000	-31,93%	0,00%
C1+C2+C3	7.674.000	-3.600.000	-31,93%	0,00%

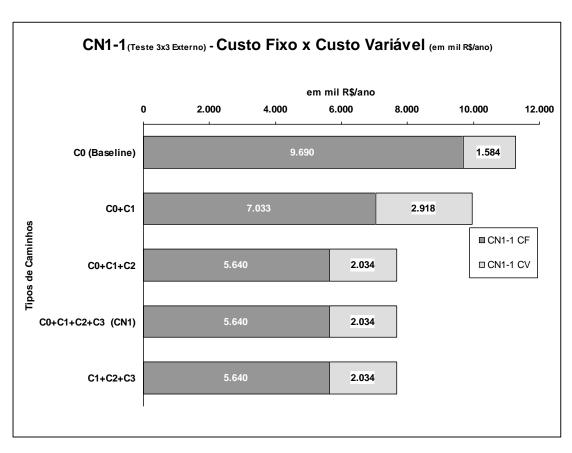


Figura 4.8 - Gráfico Custo Fixo x Custo Variável no Transporte CN11

Tabela 4.17 - Resultado da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN21

RESULTAI	RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - CN2-1 completo D						
Parâmetros:	Qtd (unid)		Rede Distribuição	Cenário Econômico			
Origens		3	RD 2	CE 1			
Destinos		3	ND 2	OL 1			
Alternativas	Custo Transporte (R\$/ano)	Resultado sobre a Base Atual (R\$/ano)	Resultado sobre a Base Atual (%)	Resultado Marginal (diferença em relação a instância anterior)			
C0 (Base Atual)	10.383.000						
C0+C1	8.163.000	-2.220.000	-21,38%	-21,38%			
C0+C1+C2	6.783.000	-3.600.000	-34,67%	-16,91%			
C0+C1+C2+C3 (CN2-1)	6.782.000	-3.601.000	-34,68%	-0,01%			
C1+C2+C3	6.782.000	-3.601.000	-34,68%	0,00%			

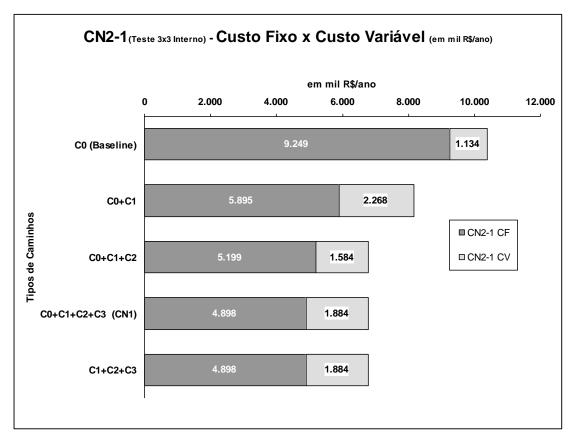


Figura 4.9 - Gráfico Custo Fixo x Custo Variável no Transporte CN21

Tabela 4.18 - Resultado da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN31

RESULTAD	OS DA ANÁLIS	E DE SENSIBILI	DADE - CN3-1 com	pleto D
Parâmetros:	Qtd (unid)		Rede Distribuição	Cenário Econômico
Origens		4	RD 3	CE 1
Destinos		4	ND 0	OL 1
Alternativas	Custo	Resultado	Resultado	Resultado Marginal
7.110.7121.7120	Transporte (R\$/ano)	sobre a Base Atual (R\$/ano)	sobre a Base Atual (%)	(diferença em relação a instância anterior)
C0 (Base Atual)	21.008.000			
C0+C1	19.060.000	-1.948.000	-9,27%	-9,27%
C0+C1+C2	14.610.000	-6.398.000	-30,46%	-23,35%
C0+C1+C2+C3	14.610.000	-6.398.000	-30,46%	0,00%
C0+C1+C2+C3+C4 (C3-1)	14.610.000	-6.398.000	-30,46%	0,00%
C1+C2+C3+C4	14.610.000	-6.398.000	-30,46%	0,00%

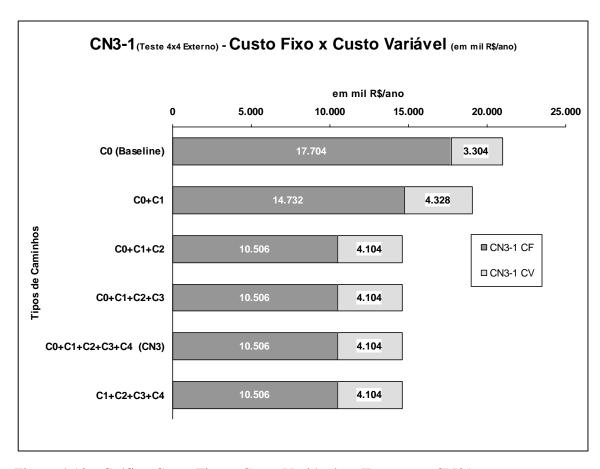


Figura 4.10 - Gráfico Custo Fixo x Custo Variável no Transporte CN31

Tabela 4.19 - Resultado da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN41

RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - CN4-1 completo D						
Parâmetros: Qtd (unid)		(unid)	Rede Distribuição	Cenário Econômico		
Origens		4	RD 4	CE 1		
Destinos		4	KD 4	OL 1		
Alternativas	Custo Transporte (R\$/ano)	Resultado sobre a Base Atual (R\$/ano)	Resultado sobre a Base Atual (%)	Resultado Marginal (diferença em relação a instância anterior)		
C0 (Base Atual)	19.648.000					
C0+C1	16.900.000	-2.748.000	-13,99%	-13,99%		
C0+C1+C2	13.248.000	-6.400.000	-32,57%	-21,61%		
C0+C1+C2+C3	13.248.000	-6.400.000	-32,57%	0,00%		
C0+C1+C2+C3+C4 (C4-1)	13.248.000	-6.400.000	-32,57%	0,00%		
C1+C2+C3+C4	13.248.000	-6.400.000	-32,57%	0,00%		

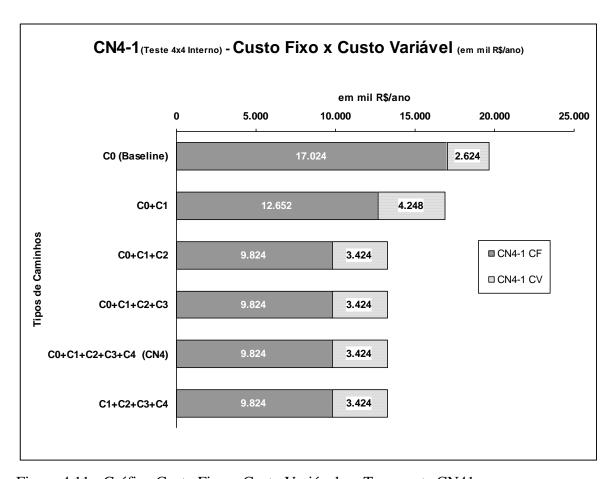


Figura 4.11 - Gráfico Custo Fixo x Custo Variável no Transporte CN41

Tabela 4.20 - Resultado da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN51

RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - CN5-1 completo D								
Parâmetros:	Qtd (unid)		Rede Distribuição	Cenário Econômico				
Origens	5		RD 5	CE 1				
Destinos	5		ND 3					
Alternativas	Custo	Resultado	Resultado	Resultado Marginal				
	Transporte	sobre a	sobre a	(diferença em				
	(R\$/ano)	Base Atual (R\$/ano)	Base Atual (%)	relação a instância anterior)				
C0 (Base Atual)	34.480.000							
C0+C1	31.885.000	-2.595.000	-7,53%	-7,53%				
C0+C1+C2	24.480.000	-10.000.000	-29,00%	-23,22%				
C0+C1+C2+C3	24.480.000	-10.000.000	-29,00%	0,00%				
C0+C1+C2+C3+C4	24.480.000	-10.000.000	-29,00%	0,00%				
C0+C1+C2+C3+C4+C5 (C5-1)	24.480.000	-10.000.000	-29,00%	0,00%				
C1+C2+C3+C4+C5	24.480.000	-10.000.000	-29,00%	0,00%				

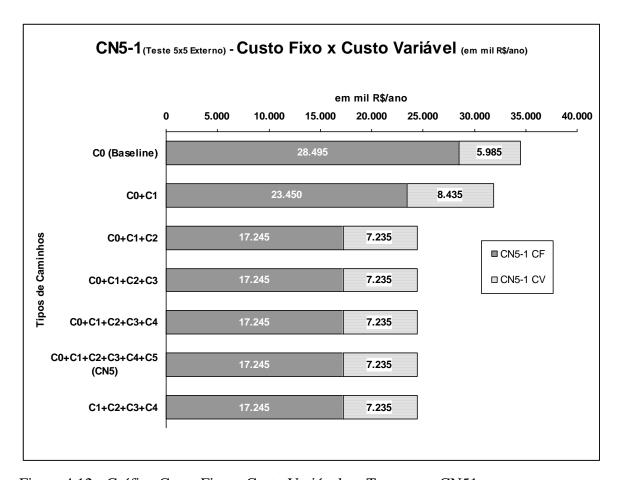


Figura 4.12 - Gráfico Custo Fixo x Custo Variável no Transporte CN51

Tabela 4.21 - Resultado da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN61

RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - CN6-1 completo D								
Parâmetros:	Qtd (unid)		Rede Distribuição	Cenário Econômico				
Origens	5		RD 6	CE 1				
Destinos	5		ND 0					
Alternativas	Custo Transporte (R\$/ano)	Resultado sobre a Base Atual (R\$/ano)	Resultado sobre a Base Atual (%)	Resultado Marginal (diferença em relação a instância anterior)				
C0 (Base Atual)	32.670.000							
C0+C1	29.380.000	-3.290.000	-10,07%	-10,07%				
C0+C1+C2	22.670.000	-10.000.000	-30,61%	-22,84%				
C0+C1+C2+C3	22.670.000	-10.000.000	-30,61%	0,00%				
C0+C1+C2+C3+C4	22.668.750	-10.001.250	-30,61%	-0,01%				
C0+C1+C2+C3+C4+C5 (C6-1)	22.668.750	-10.001.250	-30,61%	0,00%				
C1+C2+C3+C4+C5	22.668.750	-10.001.250	-30,61%	0,00%				

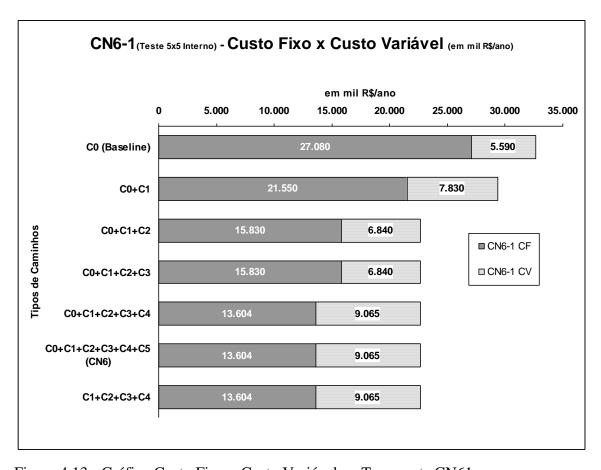


Figura 4.13 - Gráfico Custo Fixo x Custo Variável no Transporte CN61

Como conclusão desta análise de sensibilidade, tem-se que, em nenhum cenário os caminhos do tipo C0 foram utilizados indicando, que o modelo *SPOT* de transporte não se mostra competitivo para as curtas distâncias como já era esperado.

Mesmo com estes resultados, para um caso real pode ser importante manter este tipo de caminho no modelo, não só como Base Atual ou *Benchmarking*, mas também, como parte integrante da solução ótima.

Por outro lado, os caminhos do tipo C3, C4, C5 embora possam até participar da solução ótima como mostrado em alguns cenários, não trouxeram, em nenhum deles contribuição significativa na redução do custo total de transporte.

4.5.2 Análise de Sensibilidade com relação aos Cenários Econômicos.

A Análise de Sensibilidade dos Cenários Econômicos busca, através da variação dos parâmetros do cenário econômico, conhecer melhor a robustez do modelo perante a diferentes tipos de veículos, ou mesmo, diferentes políticas de reposição da frota.

Quanto menor for a idade média da frota, maior deve ser sua parcela de custo fixo mensal, entretanto, o custo variável por quilômetro pode ser menor em função do melhor estado do equipamento.

Na Tabela 4.22 é apresentado o resumo dos cenários utilizados nesta análise de sensibilidade.

Tabela 4.22 - Cenários Utilizados na Análise de Sensibilidade

REDES DE DISTRIBUIÇÃO (RD)		CENÁRIOS ECONÔMICOS (CE)			
		CE0	CE1	CE2	CE3
3 origens e 3 destinos	RD1	CN10	CN11	CN12	CN13
	RD2	CN20	CN21	CN22	CN23
4 origens e 4 destinos	RD3	CN30	CN31	CN32	CN33
	RD4	CN40	CN41	CN42	CN43
5 origens e 5 destinos	RD5	CN50	CN51	CN52	CN53
	RD6	CN60	CN61	CN62	CN63

Na Tabela 4.24 é apresentado o resumo dos cenários econômicos utilizados nesta análise de sensibilidade.

Nestes cenários econômicos todos os parâmetros relacionados a produtividade, tais como tempo total disponível, velocidade média, tempos de carga, descarga e busca são mantidos. Os parâmetros de custo (Custo Fixo e Custo Variável) são os que diferenciam estes cenários.

Os resultados desta análise de sensibilidade são mostrados na Tabela 4.24 e na Figura 4.13, onde percebe-se que a mudança no cenário econômico tem impacto na redução final do custo de transporte, contudo, o resultado continua significativo mesmo nos cenários menos favoráveis.

Tabela 4.23 - Cenários Econômicos

CENÁRIOS ECONÔMICOS						
Parâmetro	CE 0	CE 1	CE 2	CE 3	Unid	Obs:
Custo Fixo Mensal	12.000,00	10.000,00	8.000,00	6.000,00	R\$/mês	Considera as parcelas de remuneração de capital, salário do motorista, salário oficina, reposição do veículo, reposição carroceria, licenciamento, seguro casco do veículo, seguro do equipamento, seguro de responsabilidade civil facultativa
Custo Variável	0,80	1,00	1,20	1,40	R\$/Km	Peças, acessórios e materiais de manutenção, combustível, lubrificantes, lavagem/lubrificação e pneus
Tempo Total	200	200	200	200	h/mês	Tempo Total disponível do equipamento/motorista para operações de carga, descarga, busca e transporte. (total de 220 h/mês descontadas de 20 h para paradas técnicas ou manutenção)
Velocidade Média	50	50	50	50	Km/h	Média Considerada para percursos com trechos urbanos e rodoviários
Tcarga	4	4	4	4	h	Tempo médio que inclui todos os processos administrativos, burocráticos e de operação
Tdescarga	4	4	4	4	h	Tempo médio que inclui todos os processos administrativos, burocráticos e de operação
Tbusca	20	20	20	20	h	Tempo médio para identificação de carga de retorno no caminho C0
Parcela de C1 paga para fazer apenas C0 (spot)	50%	50%	50%	50%	%	Parcela do custo do caminho C1, que tem Tbusca > 0 e Tcarga e Tdescarga dobrados.
					ı	
Distância Máxima para C1 < C0	300	250	200	150	km	Distância até a qual compensa dedicar a frota, pois o tempo perdido é mais importante do que aguardar a carga de retorno.

Quanto maior o componente fixo e menor o componente variável (CE 0), melhor será o resultado na redução do custo de transporte. Por outro lado, quanto menor for o componente fixo e maior for o componente variável (CE 3), menor será a redução neste custo.

Como conclusão desta análise de sensibilidade pode-se afirmar que o cenário econômico em que se desenvolve a operação de transporte é fator crítico para o sucesso do modelo.

Tabela 4.24 - Redução do Custo de Transporte comparado à Base Atual

REDES DE DISTRIBUIÇÃO		CENÁRIOS ECONÔMICOS (CE)				
(RD)	-	CE0	CE1	CE2	CE3	
3 origens e	RD1	-34,90%	-31,93%	-27,97%	-22,40%	
3 destinos	RD2	-37,50%	-34,68%	-30,82%	-25,21%	
4 origens e	RD3	-33,48%	-30,46%	-26,47%	-20,97%	
4 destinos	RD4	-35,51%	-32,57%	-28,63%	-23,04%	
5 origens e	RD5	-32,07%	-29,00%	-25,02%	-19,62%	
5 destinos	RD6	-33,63%	-30,61%	-26,62%	-21,12%	

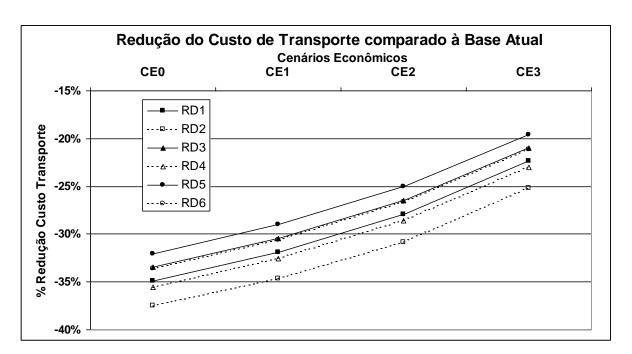


Figura 4.14 - Gráfico da Redução do Custo de Transporte comparado à Base Atual

Observa-se na Figura 4.13 que existe uma diminuição da economia do custo de transporte com os caminhos conjugados a cada vez que se cresce o cenário econômico.

Isto ocorre, pois nestes cenários econômicos maiores os custos variáveis crescem, tornando os caminhos conjugados menos competitivos, já que estes percorrem maiores distâncias quando comparados às distâncias dos caminhos *C*0.

4.6 Análise de Sensibilidade da Demanda

Como todos os cenários anteriores foram realizados com a demanda uniforme (1.000 viagens/ano) em todas as rotas, nesta análise de sensibilidade buscou-se entender o comportamento do modelo no caso de demanda aleatória.

Para isto, foram gerados, para cada Rede de Distribuição, 10 instâncias com demandas aleatórias com distribuição uniforme entre 0 a 2.000 viagens/ano.

Na Tabela 4.25 são mostrados os resultados médios das 10 instâncias de demanda aleatória.

Tabela 4.25 - Resultado Analise Sensibilidade - Demanda Aleatória - CN11

RESULTAD	OS DA ANÁLISE	DE SENSIBILIDA	NDE - CN1-1 complet	to D A1-10	
Parâmetros:	Qtd (unid)		Rede Distribuição	Cenário Econômico	
Origens		3	RD 1	CE 4	
Destinos	3		RD I	CE 1	
Alternativas	Custo Transporte (R\$/ano)	Resultado sobre a Base Atual (R\$/ano)	Resultado sobre a Base Atual (%)	Resultado Marginal (diferença em relação a instância anterior)	
C0 (Base Atual)	10.781.838				
C0+C1	9.629.879	-1.151.959	-10,68%	-10,68%	
C0+C1+C2	8.014.839	-2.766.999	-25,66%	-16,77%	
C0+C1+C2+C3 (CN1-1)	7.957.838	-2.824.001	-26,19%	-0,71%	
C1+C2+C3	7.957.838	-2.824.001	-26,19%	0,00%	

Tabela 4.26 - Resultado Analise Sensibilidade - Demanda Aleatória - CN21

RESULTAD	OS DA ANÁLISE	DE SENSIBILIDA	ADE - CN2-1 complet	to D A1-10
Parâmetros:	Qtd (unid)		Rede Distribuição	Cenário Econômico
Origens	3		RD 2	CE 1
Destinos			KD 2	CET
Alternativas	Custo Transporte (R\$/ano)	Transporte sobre a		Resultado Marginal (diferença em relação a instância anterior)
C0 (Base Atual)	9.913.477			
C0+C1	7.886.831	-2.026.646	-20,44%	-20,44%
C0+C1+C2	6.909.823	-3.003.654	-30,30%	-12,39%
C0+C1+C2+C3 (CN2-1)	6.881.009	-3.032.468	-30,59%	-0,42%
C1+C2+C3	6.881.009	-3.032.468	-30,59%	0,00%

Os resultados desta Análise de Sensibilidade com a Demanda Aleatória mostram que o potencial de redução de custo de transporte, embora menor, ainda é significativo.

Outro fator que chamou a atenção é a maior contribuição dos caminhos do tipo C3, que quando adicionados nos casos de demanda aleatória contribuíram com uma redução média de -0,56%, enquanto com demanda balanceada essa contribuição foi de no máximo -0,01%. Isto indica que o desbalanceamento de uma rede pode provocar a utilização de caminhos de nível mais elevado de conjugação.

4.7 Resultados obtidos nos Casos-Teste

Os resultados alcançados até o presente momento permitem concluir que o modelo de otimização para designação de rotas com frota dedicada apresenta bom potencial de redução do custo total de transporte.

Na Figura 4.15 é mostrado o resumo dos resultados das análises de sensibilidade do Cenário CN1 e na Figura 4.16 o resumo do CN2.

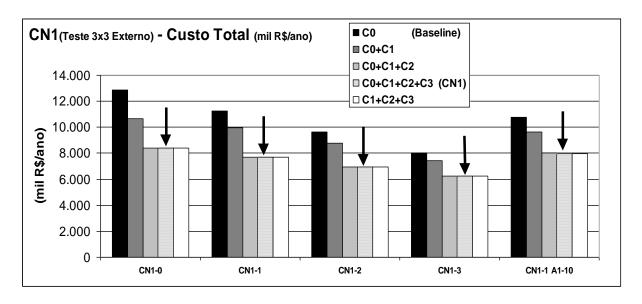


Figura 4.15- Resumo dos Resultados da CN 1

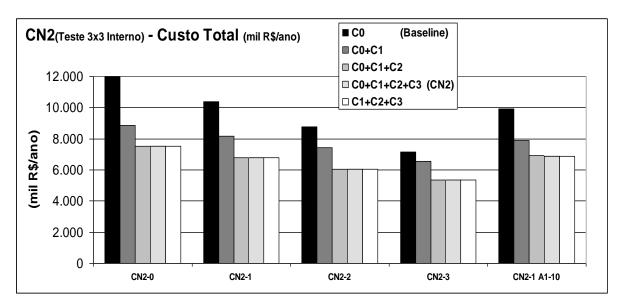


Figura 4.16 - Resumo dos Resultados da CN 2

Como conclusão deste capítulo tem-se que o modelo de programação linear inteira desenvolvido foi validado e testado em vários cenários e mostrou-se adequado para tratar o problema, comportando-se como o esperado. Portanto, o modelo está apto para a aplicação em rede de distribuição de Linha Branca, que será tratado no próximo capítulo.

5 APLICAÇÃO NUMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE LINHA BRANCA

5.1 Escopo e Parâmetros de uma RD de Linha Branca

A Aplicação em uma Rede de Distribuição de Linha Branca envolve uma rede de distribuição nacional de produtos de linha branca, com quatro (4) fábricas ou origens e cento e oitenta e cinco (185) destinos de cargas completas, conforme mostrado na Figura 5.1.

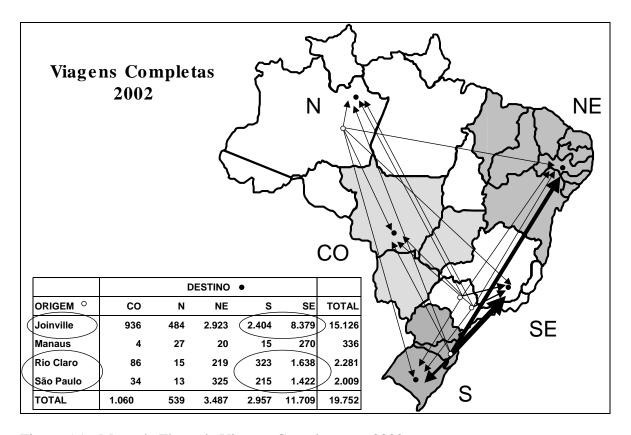


Figura 5.1 - Mapa de Fluxo de Viagens Completas em 2002

Os clientes e os CDC's, que são atendidos diretamente pelas fábricas, são divididos em 185 grupos. Estes grupos, por sua vez, são montados utilizando os conceitos de meso e micro regiões definidas pelo IBGE.

O escopo do trabalho, isto é, o tamanho da rede a ser analisada, foi definido como as regiões Sul e Sudeste, pois os números de viagens por origem/destino mostram que essas regiões possuem o melhor potencial de conjugação de rotas. Isto ocorre porque estas regiões apresentam o maior fluxo de viagens entre regiões e também pelas distâncias envolvidas entre os destinos e as origens, que geram custos mais competitivos de caminhos conjugados quando comparados aos *spots*.

Esta Rede de Distribuição definida no escopo é composta por 3 origens e 55 destinos e será identificada pela sigla RD7, em continuação a numeração das redes de distribuição dos casos-teste.

5.2 Aplicação do Gerador de Caminhos em uma RD de Linha Branca

A Aplicação do Gerador de Caminhos nas regiões Sul e Sudeste da Rede de Distribuição de Linha Branca, mostrada na Tabela 5.1, apresentou os resultados previstos pela regra de formação mostrada na equação (2) do item 3.3 deste trabalho, já que essas regiões possuem 3 origens e 55 destinos.

Neste processo foram gerados mais de 320 mil caminhos possíveis somando todos os tipos C0, C1, C2 e C3. Quando comparados aos 165 caminhos que atendem atualmente esta operação, percebe-se um grande potencial de redução de custos.

Tabela 5.1 - Resultado do Gerador de Caminhos para Cenário 71 (Caso Real 3x55)

REGRA DE GERAÇÃO DE CAMINHOS				
Parâmetros:	Qtd (unid)			
Origens	3			
Destinos	55			
Resultados:	Qtd (unid)			
caminhos C0	165			
caminhos C1	165			
caminhos C2	8.910			
caminhos C3	314.820			
Total	324.060			

Na Figura 5.2 são mostrados alguns exemplos de caminhos do tipo C2 e C3 com o mapa da região estudada de fundo.

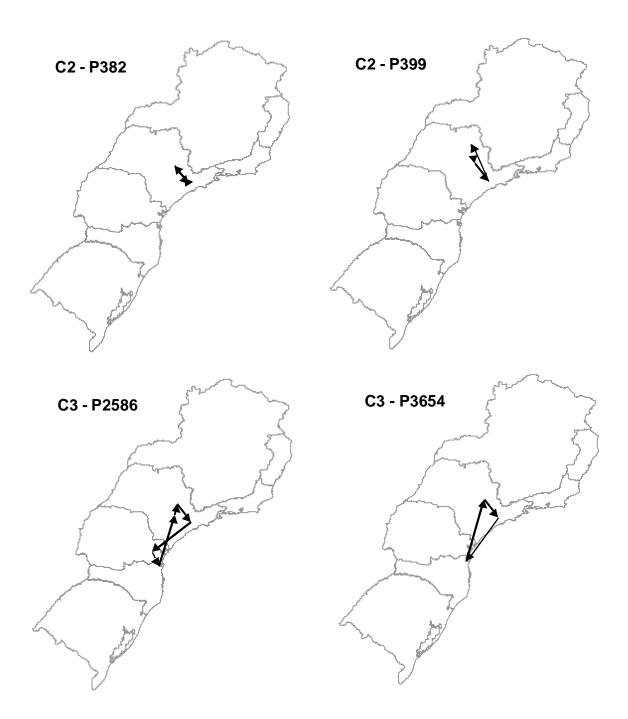


Figura 5.2 - Exemplos de Rotas Conjugadas da Solução Ótima CN71 filtro D

5.3 Aplicação do Custeador de Caminhos em uma RD de Linha Branca

Na aplicação do Custeador de Caminhos foram utilizados os resultados do gerador de caminhos e o cenário econômico de referência CE1, cujos parâmetros estão descritos na Tabela 3.5.

Após a aplicação do Custeador de Caminhos foi possível implantar um filtro, sugerido indiretamente por SOUZA (1999) e aplicado por TACLA (2003), onde se limita a quantidade de caminhos conjugados para o Modelo de Programação Linear Inteira através da eliminação dos caminhos cujos custos sejam maiores do que a soma dos custos do caminhos C0 equivalentes. Estes resultados são resumidos na Tabela 5.2, que mostra que apenas 1,22% dos caminhos gerados mostraram-se competitivos em relação ao custo dos caminhos C0.

Tabela 5.2 - Resultado do Custeador de Caminhos - Caso Real CN71 filtro D

RESULTADO	RESULTADO CUSTEADOR DE CAMINHOS - CN71 filtro D					
Parâmetros:	Qtd (unid)	Rede Distribuição	Cenário Econômico			
Origens	3	RD 7	CE 1			
Destinos	55	KD 7	OL 1			
Resultados:	Qtd de Caminhos Gerados (unid)	Qtd Caminhos com custo menor que C0 (unid)	%			
caminhos C0	165	165	100,00%			
caminhos C1	165	165	100,00%			
caminhos C2	8.910	309	3,47%			
caminhos C3	314.820	3.315	1,05%			
Total	324.060	3.954	1,22%			

5.4 Resultados do Modelo Matemático em uma RD de Linha Branca

Como dados de entrada para o modelo de programa linear inteira tem-se:

- a) Resultado do Gerador de Caminhos;
- b) Resultado do Custeador de Caminhos;
- c) Resultado da Aplicação do Filtro nos caminhos gerados;
- d) Demanda de viagens completas do ano de 2002 (regiões Sul e Sudeste).

O Cenário Otimizado, com todos os tipos de caminhos, apresentou uma redução de 4,08% no custo de transporte conforme mostrado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Resultado do Modelo Matemático- Custos - Cenário 71 filtro D

	Custo de Transporte (R\$/ano)
Situação Atual (Padrão C0)	29.349.026,00
Situação Proposta (C0,C1, C2,C3)	28.152.776,00
Impacto no Custo de Transporte	(1.196.250,00)
	-4,08%

Na Tabela 5.4 são detalhadas a quantidades de caminhos geradas, filtradas e utilizadas na solução ótima do modelo, bem como a quantidade de viagens anuais por tipo de caminho. Nota-se que cerca de 74% das viagens continuaram sendo atendidas por frota *spot*, enquanto os 26% restantes são atendidas por caminhos do tipo C1, C2 e C3.

Tabela 5.4 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 71 filtro D

RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - CN71 filtro D						
Parâmetros:	Qtd	(unid)	Rede Distribuição	Cenário Econômico		
Origens		3	RD 7	CE 1		
Destinos	:	55	KD 7	OL 1		
Resultados:	Qtd de Caminhos Gerados (unid)	Caminhos Gerados Qtd Caminhos com custo menor que C0 (unid)		Qtd de Viagens na Solução Ótima (viagens/ano)		
caminhos C0	165	165	80	10.638		
caminhos C1	165	165	15	2.826		
caminhos C2	8.910	309	14	668		
caminhos C3	314.820 3.315		5	243		
Total	324.060	3.954	114	14.375		

Existia uma preocupação na modelagem por programação linear inteira que a matriz de coeficientes não seria totalmente unimodular, fazendo com que o problema relaxado tivesse resultados não-inteiros. Entretanto, como pode ser observado na Tabela 5.5, o resultado do modelo relaxado (programação linear) já gerou uma solução ótima com todas as variáveis de decisão inteiras.

Tabela 5.5 - Relatório de Saída do Modelo de Programação Linear Inteira CN71 filtro D

```
Proven optimal solution.

MIP Solution: 28,152,776.000000 (73 iterations, 0 nodes)

Final LP: 28,152,776.000000 (0 iterations)

Best integer solution possible: 28,152,776.000000

Absolute gap: 0

Relative gap: 0
```

A análise dos resultados econômicos da solução do modelo indicou que 75% da redução de custo está baseada nos caminhos do tipo C1 (vai com carga e retorna vazio), enquanto o transporte conjugado, isto é, os caminhos C2 e C3 representam apenas 25% da redução.

Estes resultados provocaram uma análise mais detalhada, mostrada na Tabela 5.6, onde os custos de transporte foram detalhados por cada tipo de caminho. No caso do Custo do Transporte Atual (A) foram calculados os custos dos caminhos C0 equivalentes às viagens conjugadas geradas na solução ótima, cujos custos de transporte estão em (B).

Os resultados desta análise mais detalhada mostram, que embora tenham representado relativamente pouco impacto no custo total, estas rotas conjugadas geraram reduções entre 17% e 24% no custo de transporte quando comparadas às viagens *spot* equivalentes.

Tabela 5.6 - Resultado do Modelo Matemático - Detalhado - Cenário 71 filtro D

RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO - CN71 filtro D							
Parâmetros:	Qtd (unid)		Rede Distribuição	Cenário Econômico			
Origens		3	RD 7	CE 1			
Destinos	Ę	55					
Tipo de Caminho	Custo Transporte Atual (R\$/ano)	Custo Transporte Modelo (R\$/ano) Resultado (R\$/ano)		Resultado (%)	Impacto Total (%)		
	(A)	(B)	(B) (C)	(C)/(A)	(C)/ Total (A)		
caminhos C0	24.902.598	24.902.598	0	0,00%	0,00%		
caminhos C1	3.060.404	2.164.408	-895.996	-29,28%	-3,05%		
caminhos C2	931.426	708.254	-223.172	-23,96%	-0,76%		
caminhos C3	454.598	377.516	-77.082	-16,96%	-0,26%		
Total	29.349.026	28.152.776	-1.196.250	-4,08%	-4,08%		

5.5 Análise de Sensibilidade da RD de Linha Branca

A Análise de Sensibilidade se baseará em três frentes, mostradas a seguir, onde a análise de sensibilidade dos cenários econômicos foi substituída pela Expansão da Rede de Distribuição definida no escopo inicial.

- 5.5.1 Análise de Sensibilidade com relação aos de tipos de caminhos disponíveis;
- 5.5.2 Análise de Sensibilidade da Demanda;
- 5.5.3 Análise de Sensibilidade da Expansão da Rede de Distribuição.

5.5.1 Análise de Sensibilidade dos Tipos de Caminhos Disponíveis

A Análise de Sensibilidade dos Tipos de Caminhos Disponíveis, mostrada na Tabela 5.7, corrobora a análise de que os caminhos conjugados apresentam pequeno impacto na redução do custo total de transporte.

Além disto, esta análise de sensibilidade mostra a importância que os caminhos do tipo C0 ainda representam na solução ótima, pois ao utilizar exclusivamente frota dedicada o custo total de transporte pode crescer cerca de 30%.

Tabela 5.7 - Resultado da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN71 filtro D

RESULT	RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - CN71 filtro D						
Parâmetros:	Qtd	(unid)	Rede Distribuição	Cenário Econômico			
Origens		3	RD 7	CE 1			
Destinos		55	KD /	CE 1			
Alternativas	Custo Transporte (R\$/ano)	Resultado sobre a Base Atual (R\$/ano)	Resultado sobre a Base Atual (%)	Resultado Marginal (diferença em relação a instância anterior)			
C0 (Base Atual)	29.349.026						
C0+C1	28.331.616	-1.017.410	-3,47%	-3,47%			
C0+C1+C2	28.166.364	-1.182.662	-4,03%	-0,58%			
C0+C1+C2+C3 (CN71)	28.152.776	-1.196.250	-4,08%	-0,05%			
C1+C2+C3	37.552.188	8.203.162	27,95%	33,39%			
C1+C2	38.172.408	8.823.382	30,06%	1,65%			
C1	38.573.052	9.224.026	31,43%	1,05%			

A análise de participação do custo fixo e variável no custo total de transporte para cada instância, mostrada na Figura 5.3, indica claramente que o aumento da distância percorrida nos caminhos conjugados é mais do que compensado pela redução do custo fixo.

Como exemplo pode-se comparar as instâncias com apenas C0 e com todos os tipo de caminhos. Neste caso, o aumento de custo variável foi de + 5,27%, enquanto a redução de custo fixo foi de - 7,70%. Estes impactos geraram uma redução de -4,08% no custo total de transporte, já que se trata de uma média ponderada.

Ao se comparar o cenário CN61 (Figura 4.13) com o cenário CN71 (Figura 5.3) nota-se que ocorreu o mesmo movimento de aumento do custo variável e redução do custo fixo, entretanto, a amplitude desse movimento foi significativamente menor no segundo caso, pois fatores como quantidade de pontos de origens e destinos, sua disposição bem como a demanda estão idealmente organizados nos cenário teste.

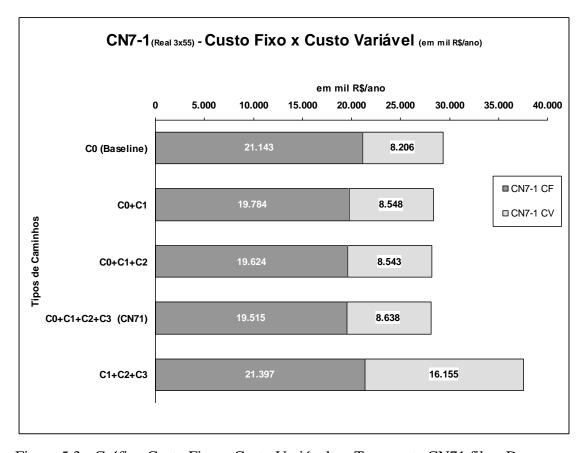


Figura 5.3 - Gráfico Custo Fixo x Custo Variável no Transporte CN71 filtro D

Na Figura 5.4 é mostrado o gráfico do custo de transporte por tipo de caminho para cada instância desta análise de sensibilidade.

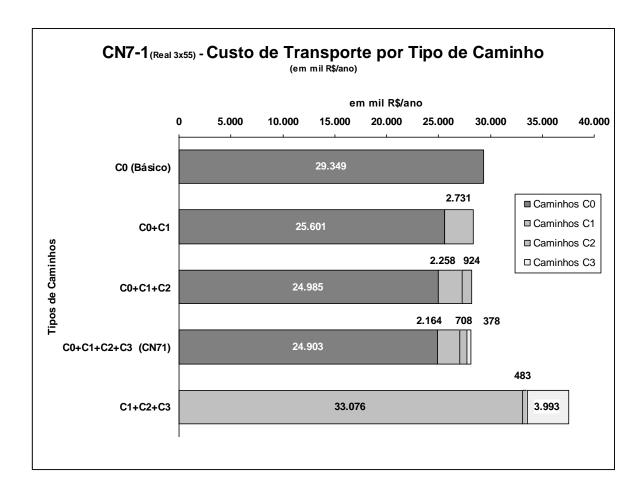


Figura 5.4 - Gráfico Custo do Transporte por Tipo de Caminho CN71 filtro D

5.5.2 Análise de sensibilidade da Demanda

A Análise de Sensibilidade da Demanda foi realizada no cenário CN71 com base nas seguintes instâncias:

- a) Demanda +1 : demanda atual com acréscimo de 1 viagem/ano em cada par origem/destino;
- b) Demanda +100 : demanda atual com acréscimo de 100 viagem/ano em cada par origem/destino;
- c) Demando =100: demanda balanceada com 100 viagem/ano em cada par origem/destino;
- d) Demanda Aleatória: demanda aleatória com distribuição uniforme entre 0 e
 100 viagens/ano, em 10 instâncias.

Os resultados desta análise de sensibilidade estão resumidos na Figura 5.5, onde o custo total de transporte é mostrado para cada instância de tipo de caminho em cada instância da variação da demanda de viagens.

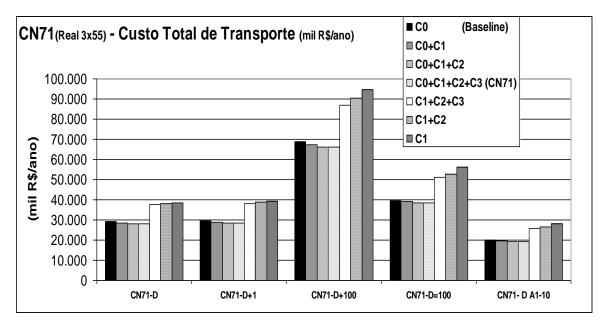


Figura 5.5 - Gráfico da Análise de Sensibilidade de Demanda CN71

Na Figura 5.6 são mostradas as quantidades de iterações que o modelo de programação linear inteira gerou para chegar na solução ótima. Isto serve como uma referência do nível de dificuldade em se solucionar o problema. E vale observar de que os cenários com um e dois níveis de caminhos geram solução ótima sem nenhuma iteração.

Um resultado importante desse modelo de programação linear inteira está no tempo de processamento, onde nenhuma das instâncias demorou mais que um minuto para ser processada. Isto demostra a viabilidade de se resolver este tipo de problema, mesmo com recursos computacionais normais. Porém, em 9 instâncias, foi necessário iniciar um processo de Branch and Bound, o que faz concluir que, portanto, ao contrário do que se imaginava, a matriz de coeficientes não é unimodular.

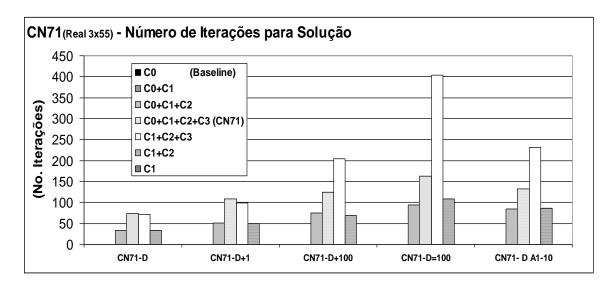


Figura 5.6 - Gráfico do No de Iterações para Solução Ótima - CN71

5.5.3 Análise de sensibilidade com a Expansão da RD de Linha Branca

Esta análise de sensibilidade da expansão da Rede de Distribuição de Linha Branca, que envolvia as regiões Sul e Sudeste e agora considera toda a Rede Nacional, foi motivada pela agilidade de solução do modelo.

Da Tabela 5.8 a Tabela 5.11 e da Figura 5.8 a Figura 5.11 estão apresentados os resultados desse cenário.

Tabela 5.8 - Resultado do Gerador de Caminhos para CN 81 (Caso Real Expandido)

RESULTADO CUSTEADOR DE CAMINHOS - CN81 D filtro						
Parâmetros: Qtd (unid) Rede Distribuição Cenário Econômico						
Origens	4	RD 8 CE 1				
Destinos	185	KD 0	OL 1			

Resultados:	Qtd Total(unid)	Qtd menor C0 (unid)	%
caminhos C0	740	740	100,000%
caminhos C1	740	740	100,000%
caminhos C2	204.240	977	0,478%
caminhos C3	49.834.560	19.120	0,038%
caminhos C4	6.802.417.440	138.756	0,002%
Total	6.852.457.720	160.333	0,002%

Tabela 5.9 - Resultado do Modelo Matemático- Custos - Cenário 81 filtro D

	Custo de Transporte (R\$/ano)
Situação Atual (Padrão C0)	63.736.176,00
Situação Proposta (C0,C1,C2,C3,C4)	62.474.092,00
Impacto no Custo de Transporte	(1.262.084,00)
	-1,98%

Tabela 5.10 - Resultado do Modelo Matemático - Caminhos - Cenário 81 filtro D

RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO - CN81 D filtro							
Parâmetros:	Qtd (unid)		Rede Distribuição	Cenário Econômico			
Origens	4		RD 8	CE 1			
Destinos	185		KD 0				
Resultados:	Qtd Total (unid)	Qtd menor C0 (unid)	Qtd Solução Ótima (unid)	Qtd Solução Ótima (viagens)			
caminhos C0	740	740	182	15.740			
caminhos C1	740	740	16	2.884			
caminhos C2	204.240	977	14	620			
caminhos C3	49.834.560	19.120	11	498			
caminhos C4	6.802.417.440	138.756	0	0			
Total	6.852.457.720	160.333	223	19.742			

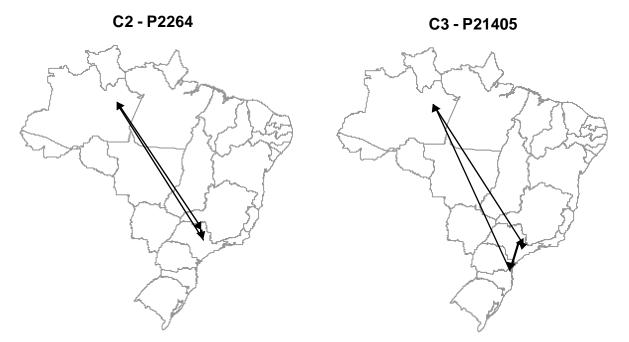


Figura 5.7 - Exemplos de Rotas Conjugadas da Solução Ótima CN81 filtro D

Figura 5.8 - Resultado do Modelo Matemático - Detalhado - Cenário 81 filtro D

RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO - CN81 filtro D						
Parâmetros:	Qtd (unid)		Rede Distribuição	Cenário Econômico		
Origens	4		RD 8	CE 1		
Destinos	185		ND 0			
Tipo de Caminho	Custo Transporte Atual (R\$/ano) (A) Custo Transporte Modelo (R\$/ano) (B)	Resultado (R\$/ano)	Resultado (%)	Impacto Total (%)		
		` '	(C)	(C)/(A)	(C)/ Total (A)	
caminhos C0	57.099.450	57.099.450	0	0,00%	0,00%	
caminhos C1	3.125.880	2.214.160	-911.720	-29,17%	-1,43%	
caminhos C2	943.890	741.240	-202.650	-21,47%	-0,32%	
caminhos C3	2.566.956	2.419.242	-147.714	-5,75%	-0,23%	
caminhos C4	0	0	0	0,00%	0,00%	
Total	63.736.176	62.474.092	-1.262.084	-1,98%	-1,98%	

Tabela 5.11 - Resultado da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN81 filtro D

RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO - CN81 D filtro						
Parâmetros:	Qtd (unid)		Rede Distribuição	Cenário Econômico		
Origens	4		RD 8	CE 1		
Destinos	185		KD 6	CET		
			T= =			
Alternativas	Custo Transporte (R\$/ano)	Resultado (R\$/ano)	Resultado Baseline	Resultado Marginal		
C0 (Baseline)	63.736.176					
C0+C1	62.706.886	-1.029.290	-1,61%	-1,61%		
C0+C1+C2	62.524.452	-1.211.724	-1,90%	-0,29%		
C0+C1+C2+C3	62.474.092	-1.262.084	-1,98%	-0,08%		
C0+C1+C2+C3+C4 (CN81)	62.474.092	-1.262.084	-1,98%	0,00%		
C1+C2+C3+C4	95.351.018	31.614.842	49,60%	52,62%		
C1+C2+C3	95.889.358	32.153.182	50,45%	0,56%		
C1+C2	99.130.198	35.394.022	55,53%	3,96%		
C1	99.833.552	36.097.376	56,64%	0,71%		

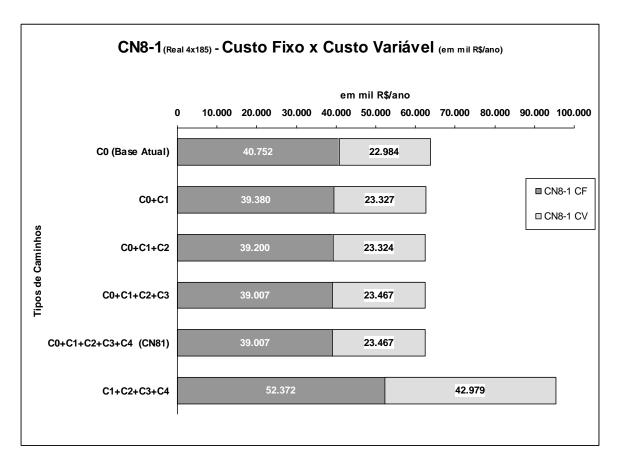


Figura 5.9 - Gráfico Custo Fixo x Custo Variável no Transporte CN81 filtro D

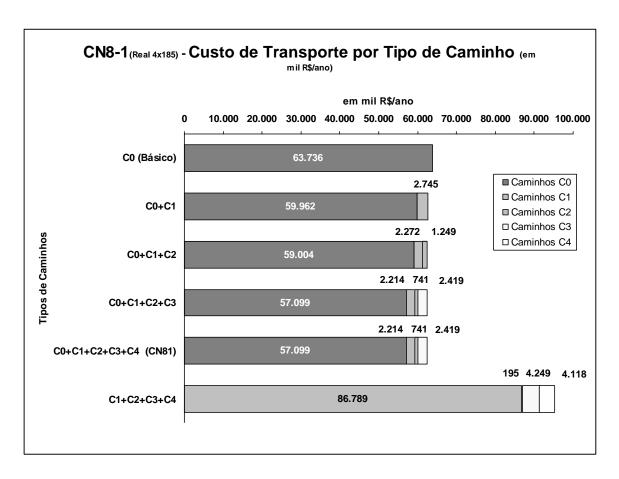


Figura 5.10 - Gráfico Custo do Transporte por Tipo de Caminho CN81 filtro D

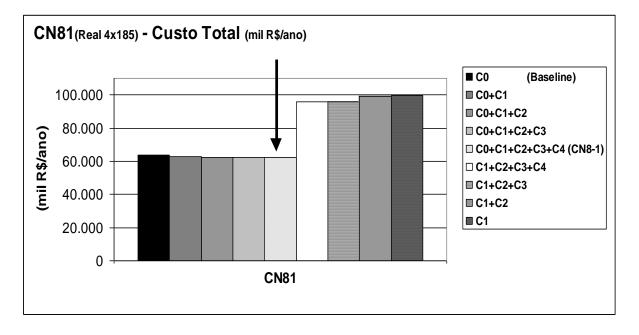


Figura 5.11 - Gráfico da Análise de Sensibilidade por tipo de caminho CN81 filtro D

5.6 Resultados obtidos na aplicação em uma RD de Linha Branca

Os resultados de redução de custo total de transporte aumentaram de maneira pouco significativa em termos absolutos com a expansão da Rede de Distribuição de Linha.

Entretanto, estes resultados já eram esperados, pois as regiões Nordeste e Centro-Oeste não possuem fábricas ou origens, o que dificulta a formação de viagens conjugadas (tipo C2,C3, ..., Cr) e também apresentam distância muito elevadas para utilizar caminhos do tipo C1.

A Região Norte, mesmo apresentando uma fábrica, ou seja, oportunidades de conjugação de viagens, não gerou quantidade significativa para compensar o aumento da base de viagens do tipo spot ou caminhos do Tipo CO.

Estes resultados de redução do custo de transporte encontrados no modelo para serem efetivados, necessitam de adequações nos processos operacionais para garantir a máxima utilização da frota dedicada.

6 CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS

Neste capítulo é concluído o trabalho e apresentadas propostas para desenvolvimento de estudos futuros.

6.1 Conclusões

O Trabalho de Designação de Rotas para uma Frota Dedicada em uma Rede de Distribuição de Linha Branca trouxe as seguintes contribuições, quando comparado à literatura existente.

- a) O desenvolvimento de uma metodologia para transporte conjugado com enfoque na rede de um embarcador;
- Visão do custo de transporte, em contra partida, à busca de melhores preços de frete através de licitações;
- c) Processo de geração de caminhos, onde se descreveu a regra de formação de caminhos conjugados, permitindo o dimensionamento do tamanho do problema com antecedência;
- d) Identificação de um limite máximo para a conjugação de rotas;
- e) O Modelo de Programação Linear Inteira tem seu ótimo obtido já na relaxação por programação linear na maior parte das instâncias (apenas 9 em mais das 200 instâncias necessitou Branch and Bound); isto permite concluir que a matriz de restrições não é totalmente unimodular;
- f) Os resultados de redução de custo de transporte foram significativos em todos os cenários e instâncias otimizados.

6.2 Propostas de Estudos Futuros

Ao longo da realização deste trabalho, alguns pontos se destacaram pelo seu potencial como tema de futuras pesquisas na área e não foram explorados com maiores detalhes, pelo fato de não estarem enquadrados diretamente no objetivo desta pesquisa.

Dentre esses novos temas associados que podem ser explorados futuramente se destacam:

- A inclusão no modelo de novas restrições, tais como
 - Nível de Serviço;
 - Quilometragem total dos caminhos;
 - Capacidade de frota restrita, por exemplo, por limitação de investimento.
- Avaliação se o problema pode ser classificado como NP Hard, onde num problema
 de dimensões reais pode seu tamanho crescer exponencialmente com o número de
 restrições, tornando necessário o desenvolvimento de heurísticas para sua solução;
- Estudo com mais de um motorista (hot seat), avaliando o impacto do aumento da disponibilidade do veículo no resultado final;
- Sinergia entre inbound e outbound, pois o trabalho foca a rede de distribuição de produtos acabados;
- Colaboração com outros embarcadores, buscando um melhor balanceamento da rede conjunta, potencializando ainda mais os resultados;
- Avaliação de frota heterogênea e/ou multi-modalidade, onde os arcos nos caminhos poderiam ser percorridos por diferentes tipos de veículos e/ou modais;
- Estudos de localização que considerem no modelo de custo total o potencial de redução do custo de transporte, a formação de caminhos conjugados e frota dedicada.

6.3 Final

Uma condição para a obtenção dos resultados obtidos nesta dissertação dependem de uma mudança importante na forma de gestão do transporte do embarcador, envolvendo desde a contratação até a operação do dia-a-dia de carregamentos e descarregamentos.

E como lembram ALVARENGA; NOVAES (2000) na introdução de seu livro citando MAQUIAVEL.

"Não há nada mais difícil de manejar, mais perigoso de conduzir ou mais incerto de suceder do que levar a diante a introdução de uma ordem de coisas, pois a inovação tem por inimigos todos os que se deram bem nas condições antigas, e por defensores frágeis todos aqueles que talvez possam se dar bem nas novas."

7 BIBLIOGRAFIA

- ALBRIGHT, S.C. **VBA for Modelers:** Developing Decision Support Systems with Microsoft Excel. Canada, Duxbury, 2001.
- ALVARENGA, A.C.; NOVAES, A.G. **Logística Aplicada** Suprimentos e Distribuição Física. 3.ed. Editora Edgard Blucher, 2000.
- ARNOLD, J.R.T.; CHAPMAN, S.N. **Introduction to Materials Management**. 4.ed. New Jersey, Prentice Hall, 2001.
- BALLOU, R.H. **Business Logistics Management** Planning, Organizing, and Controlling the Supply Chain. 4.ed. New Jersey, Prentice Hall, 1999.
- BARBOSA, R.M. Um Curso Moderno Elementar de Análise Combinatória. Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Araraquara, Brasil, 1963.
- BODIN, L.D.; GOLDEN, B.; ASSAD, A.; BALL, M. Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. **Computers & Operations Research**, vol.10, pp 63-211, 1983.
- BREWER, P.J.; PLOTT, C.R. A Decentralized, Smart Market Solution to a Class of Back-Haul Transportation Problems: Concept and Experimental Test Beds. **Interfaces**, v.32, n.5, p. 13-36, September-October 2002.
- BRITO, I. Análise do Impacto Logístico de Diferentes Regimes Aduaneiros no Abastecimento de Itens Aeronáuticos Empregando Modelo de Transbordo Multiproduto com Custos Fixos. São Paulo, 2004. 114p. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- CAIXETA, J.V.; GAMEIRO, A.H., coord. **Sistemas de Gerenciamento de Transportes:** Modelagem Matemática. São Paulo, Atlas, 2001.
- CAIXETA, J.V.; GAMEIRO, A.H., coord. **Transporte e Logística em Sistemas Agroindustriais**. São Paulo, Atlas, 2001.

- CAPLICE, C.G.. An Optimization Based Bidding Process: A New Framework for Shipper-Carrier Relationships. Massachusetts, 1996. 250p. PhD Dissertation -Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- CAPLICE, C.G.; SHEFFI, Y. Optimization Based Procurement for Transportation Services, **Journal of Business Logistics** 24:2, p. 109-128, 2003.
- CRAINIC, T.G.; LAPORTE, G.. Planning models for freight transportation, **European Journal of Operacional Research**, p. 409-4388, 1997.
- CUNHA, C.B. Uma contribuição para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais. São Paulo, 1997. 222p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- CUNHA, C.B., GUALDA, N.D.F. Heurísticas baseadas em Relaxação Lagrangiana para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais. In: XI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, nov. 1997, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro, ANPET, 1997. v.2, p.843-855.
- CUNHA, C.B. Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. **Transportes**, v.8, n.2, p.51-74, 2000.
- GUPTA, V.; PETERS, E.; MILLER, T. Implementing a Distribution-Network Decision-Support System at Pfizer/Warner-Lambert. **Interfaces,** v.32, n.4, p. 28-45, July-August 2002.
- LEDYARD, J.O. et al.. The first Use of a Combined-Value Auction for Transportation Services. **Interfaces**, v.32, n.5, p. 4-12, September-October 2002.
- MARTINS, E. Contabilidade de Custos. 9. ed. São Paulo, Atlas, 2003.
- MATOS, E.M.R. Implantação do Sistema de Custo ABC em uma Empresa de Transportes. São Paulo, 1997. 98p. Trabalho (Formatura) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

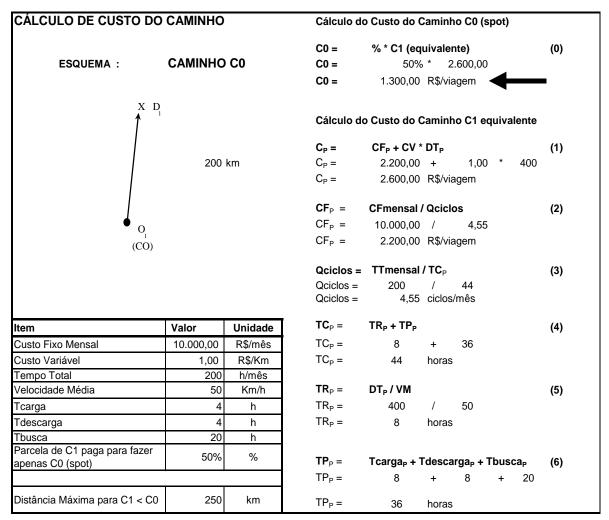
- MERCEDES-BENZ. Administração do Transporte de Carga Renovação de Frota. 1. ed., Brasil, 1988.
- MOORE, E.W.; WARMKE, J.M.; GORBAN, L.R. The Indispensable Role of Management Science in Centralizing Freight Operation at Reynolds Metals Company. Interfaces 21:1, p. 107-129, January-February 1991.
- NOVAES, A.G. Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição. Rio de Janeiro, Campus, 2001.
- PAPADIMITRIOU, C. H; STEIGLITZ, K. Combinatorial Optimization Algorithms and Complexity. New York, Dover Publications, 1998.
- POWELL, W.B.; SHEFFI, Y.; NICKERSON, K.S.; ATHERTON, S. Maximizing Profits for North American Van Line's Truckload Division: A New Framework for Pricing and Operations. **Interfaces** 18:1, p. 21-41, January-February 1988.
- SOUZA, E.C. Modelagem e Resolução de um Transporte do Tipo: "Carga Única-Coleta e Entrega" com Janelas de Tempo. São Paulo, 1999. 89p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- TACLA, D. Estudo para Otimização de Rotas no Transporte Rodoviário de Cargas Granelizadas na Indústria Química. São Paulo, 1999. 129p. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- TACLA, D. Estudo de Transporte Colaborativo de Cargas de Grande Volume, com Aplicação em caso de Soja e Fertilizante. São Paulo, 2003. 338p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- YOSHIZAKI, H.T.Y. **Planejamento e Projeto de Bases de Modelos Quantitativos de Auxílio a Decisão**. São Paulo, 1997. 199p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- YOSHIZAKI, H.T.Y. **Projeto de redes de distribuição física considerando a influência do imposto de circulação de mercadorias e serviços**. São Paulo, 2002. 144p. Tese (Livre-Docência) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ANEXO

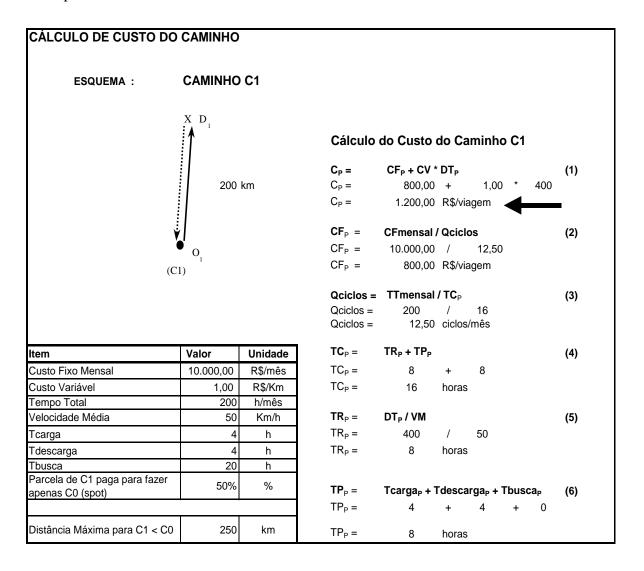
ANEXO 1 - MEMORIAL DE CÁLCULO DO CUSTEADOR DE CAMINHOS

Neste anexo são apresentados os exemplos de cálculos de custo de diferentes tipos de caminhos (C0, C1, C2 e C3). Para estes exemplos, foram utilizados os dados do Cenário Econômico CE1 e os parâmetros de distância de 200 km nos arcos produtivos e 50 km nos arcos não-produtivos.

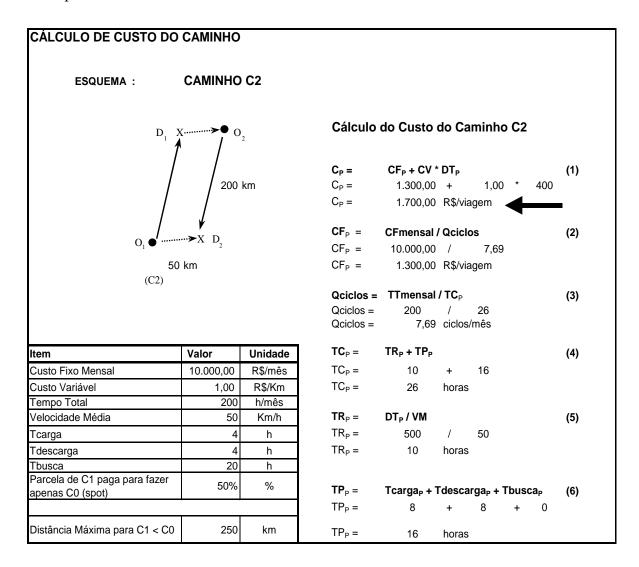
Exemplo de Cálculo de Custo de Caminho C0



Exemplo de Cálculo de Custo de Caminho C1



Exemplo de Cálculo de Custo de Caminho C2



Exemplo de Cálculo de Custo de Caminho C3

