

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS DE SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO-PPGEPS

ALFREDO DANIEL MORENO ARTEAGA

**LOCALIZAÇÃO DE CENTROS DE AUXÍLIO E DISTRIBUIÇÃO DE
SUPRIMENTOS EM OPERAÇÕES DE RESPOSTAS A DESASTRES**

Sorocaba

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS DE SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO-PPGEPS

ALFREDO DANIEL MORENO ARTEAGA

**LOCALIZAÇÃO DE CENTROS DE AUXÍLIO E DISTRIBUIÇÃO DE
SUPRIMENTOS EM OPERAÇÕES DE RESPOSTAS A DESASTRES**

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

Orientador: Prof. Dr. Douglas José Alem Junior.
Co-orientadora: Prof(a). Dr(a). Deisemara Ferreira
Financiamento: CAPES.

Sorocaba

2015

Arteaga Moreno, Alfredo Daniel.
A786l Localização de centros de auxílio e distribuição de suprimentos em
operações de respostas a desastres. / Alfredo Daniel Arteaga Moreno. --
2015.
142 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, *Campus*
Sorocaba, Sorocaba, 2015

Orientador: Douglas José Alem Junior

Banca examinadora: Begoña Vitoriano Villanueva, Fabrício Carlos
Pinheiro de Oliveira, Deisemara Ferreira

Bibliografia

1. Logística – Preparação para emergências. 2. Processo decisório –
Modelos matemáticos. I. Título. II. Sorocaba-Universidade Federal de São
Carlos.

CDD 658.7

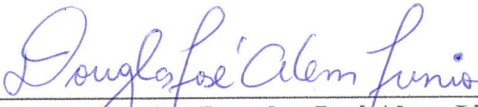
Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca *Campus* Sorocaba.

ALFREDO DANIEL MORENO ARTEAGA

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

Sorocaba, 15 de setembro de 2015

Orientador (a):

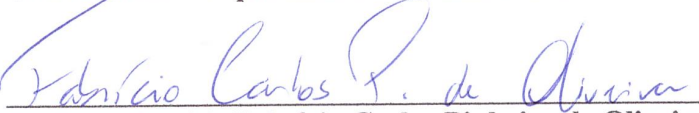


Prof. (a). Dr. (a). Douglas José Alem Júnior
UFSCar/DEPS

Examinadores (as):



Prof. (a). Dr. (a). Begoña Vitoriano Villanueva
Universidad Complutense de Madrid/Estadística e Investigación Operativa



Prof. (a). Dr. (a). Fabrício Carlos Pinheiro de Oliveira
PUC-Rio



Prof. (a). Dr. (a). Deisemara Ferreira
DFQM/UFSCar

*Dedico o resultado dessa experiência aos meus familiares e amigos,
especialmente a minha mãe Almiris Arteaga.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos recebidas.

À minha mãe Almiris, a pessoa que mais admiro na minha vida.

Ao meu irmão Argemiro pelo apoio e ajuda nestes anos.

Aos meus familiares pelo apoio apesar da distância.

Ao meu primo Rodolfo e à senhora Levis, por sua ajuda no começo dessa etapa.

A Aura Jalal pelo amor e companhia apesar da distância.

Ao meu orientador Douglas Alem e co-orientadora Deisemara Ferreira, pelo o seus aportes na minha formação pessoal e profissional.

Ao professor José, professora Eli e demais professores do programa de pós-graduação, pela ajuda e ensinamentos.

À Mafe, Karim, Diego e demais amigos que fizeram amigável e agradável a estadia fora de casa.

Às pessoas da republica Bola pela sua colaboração e paciência nesses anos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e à Erica pela colaboração e boa vontade sempre.

À CAPES- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pela bolsa de mestrado.

A todos muito obrigado.

Resumo

MORENO, Alfredo. *Localização de centros de auxílio e distribuição de suprimentos em operações de respostas a desastres*. 2015. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2015.

Os últimos desastres naturais ocorridos ao redor do mundo têm evidenciado as dificuldades das diversas organizações em gerir eficientemente as operações pós-desastre. Tais dificuldades refletem a complexidade dos problemas envolvidos nessas situações e a carência de métodos científicos aplicados ao planejamento de operações nas fases de preparação e resposta. Dentre as diversas decisões que precisam ser tomadas rapidamente em situações de desastre, têm-se a localização de centros de auxílio e a distribuição de suprimentos, essenciais à sobrevivência da comunidade afetada. Por outro lado, questões como o dimensionamento da frota necessária para atender as vítimas do desastre também são relevantes, uma vez que é um recurso escasso. Embora muitos trabalhos da literatura tenham desenvolvido modelos matemáticos para auxiliar essas decisões, poucos autores se preocuparam em gerar soluções mais eficientes integrando ambas as decisões com o dimensionamento de frota. No presente trabalho, esta integração é estudada, são desenvolvidos modelos de programação estocástica inteira mista para apoiar as decisões de localização, distribuição e dimensionamento de frota de forma integrada num contexto multi-período, multi-produto e com frota heterogênea, e ainda considerando incertezas comuns aos desastres, como quantidade de vítimas, disponibilidade de suprimentos, condições dos estoques e disponibilidade das estradas. Além disso, consideram-se o tempo das operações de transporte e custos sociais na função objetivo. Técnicas heurísticas de decomposição foram desenvolvidas para resolver instâncias de grande porte. Os modelos e as heurísticas propostas foram analisados com base nas informações do megadesastre da região Serrana do Rio de Janeiro de 2011. Os resultados indicam que os modelos matemáticos desenvolvidos fornecem soluções viáveis do ponto de vista prático e que as heurísticas implementadas são eficientes para resolver os modelos com instâncias reais.

Palavras chaves: Custo de privação. Dimensionamento da frota. Heurísticas MIP. Logística humanitária. Localização-distribuição. Programação estocástica.

ABSTRACT

The recent natural disasters around the world have shown the difficulties of the various organizations in effectively manage post-disaster operations. These difficulties reflect the complexity of the activities involved in those situations. Among the many decisions that must be made quickly in disaster situations, the location of relief centers and the distribution of supplies are essential to the survival of the affected community. On the other hand, operation as fleet sizing are also relevant since it is a scarce resource the available vehicles to perform the distribution of commodities. Although many studies in the literature have developed mathematical models to assist such decisions, few authors have integrated these decisions to get solutions that are more efficient. In the present work this integration is studied, they are developed mixed integer stochastic programming models to support location decisions, distribution and fleet sizing in a multi-period, multi-product and multi-modal context, and considering some uncertainties that are common in disasters, such as number of victims, availability of supplies, proportion of available inventory and arc availability. Also, it is considers the transportation time and social costs in the objective function. Decomposition heuristics were developed to solve large instances of the problem. Models and heuristics were analyzed based on the megadisaster in the Mountain Region of Rio de Janeiro in Brazil in 2011. The results indicate that the developed mathematical models provide efficient solutions from a practical point of view and that the implemented heuristics are efficient to solve practical instances of the models.

Keywords: Deprivation cost. Fleet Sizing. MIP heuristics. Humanitarian Logistics. Location-distribution. Stochastic programming.

Lista de Figuras

1.1	Ocorrências de desastres nos últimos 30 anos. Fonte: Adaptado de EM-DAT (2015).	16
3.1	Rede no problema de localização-distribuição de produtos.	35
3.2	Decisões e parâmetros estocásticos no problema de distribuição-localização. . . .	35
3.3	Exemplo de um horizonte de planejamento de 4 dias, cada dia (período) com 6 subperíodos de tamanho 4 horas cada um.	37
5.1	Gráfico do custo de privação $g_w(\delta)$ em função do tempo de privação.	65
5.2	Perfis de desempenho para as estratégias CPLEX testadas com o modelo FRFSMP.	69
5.3	Perfis de desempenho das estratégias <i>relax-and-fix</i> testadas com o modelo FRFSMP.	72
5.4	Perfis de desempenho das estratégias <i>fix-and-optimize</i> testadas com o modelo FRFSMP.	73
A.1	Conjuntos Pareto-ótimo obtidos para a instância M1.	109
A.2	Conjunto Pareto-ótimo para as instâncias médias.	111
A.3	Gráfico da quantidade de produtos atrasados versus custos logísticos.	113

Lista de Tabelas

2.1	Funções objetivo e principais características dos modelos determinísticos em operações de resposta a desastres.	25
2.2	Decisões apoiadas pelos modelos determinísticos em operações de resposta a desastres e métodos de solução.	26
2.3	Funções objetivo e principais características dos modelos estocásticos em operações de resposta a desastres.	30
2.4	Decisões apoiadas pelos modelos estocástico em operações de resposta a desastres e métodos de solução.	31
2.5	Variáveis aleatórias e decisões de primeiro e segundo estágio nos modelos de programação estocástica.	32
3.1	Número de restrições, variáveis contínuas, inteiras e binárias do modelo FRFSMP.	41
3.2	Número de restrições, variáveis contínuas, inteiras e binárias do modelo FRFSDC.	46
3.3	Formulação matemática bi-objetivo dos modelos FRFSMP e FRFSDC.	48
4.1	Estratégias CPLEX testadas.	52
4.2	Diferentes estratégias <i>relax-and-fix</i> testadas.	54
5.1	Desastres relacionados a inundações e movimentos de massa com mais de 100 pessoas afetadas no estado do Rio de Janeiro entre 1966 e 2013.	62
5.2	Valor dos parâmetros estocásticos de acordo ao tipo de desastre.	62
5.3	Função de custo de privação para os produtos considerados.	65
5.4	Conjunto de instâncias geradas.	67
5.5	Resultados médios das estratégias CPX1 e CPX15 para o modelo FRFSMP. . . .	70
5.6	Resultados médios das estratégias CPX15 e RFX3 para o modelo FRFSMP. . . .	72
5.7	Resultados médios das estratégias RFX3 e FXO2 para o modelo FRFSMP. . . .	74
5.8	Média dos resultados do modelo FRFSMP obtidos pelas estratégias CPX15, RFX3, FXO2, FXO7, DHIS, DHIS+RFX3, DHIS+FXO2 e DHIS+FXO7.	75

5.9	Média do tempo total e do tempo gasto pelo <i>solver</i> na resolução das instâncias do modelo FRFSMP.	76
5.10	Média dos resultados do modelo FRFSDC obtidos pela estratégia CPX1.	77
5.11	Média dos resultados do modelo FRFSDC obtidos pelas estratégias CPX15, RFX3, FXO2, FXO7, DHIS, DHIS+RFX3, DHIS+FXO2 e DHIS+FXO7.	78
5.12	Média do tempo total e do tempo gasto pelo <i>solver</i> na resolução das instâncias do modelo FRFSDC.	79
5.13	Média dos resultados do modelo FRFSDC obtidos a partir de soluções do modelo FRFSMP.	79
5.14	Valor médio dos resultados dos modelos FRFSMP, FRFSDC, FRFSMTB e FRFSDCB para cada grupo de instâncias.	84
5.15	Valor médio, desvio padrão e pior nível de serviço por produto ($S(w)$), área afetada ($S(k)$) e cenário ($S(\xi)$) para cada grupo de instâncias.	84
5.16	Média dos resultados EVPI e VSS para o modelo FRFSMP.	86
5.17	Média dos resultados EVPI e VSS para o modelo FRFSDC.	87
5.18	Valores EVPI e VSS do modelo FRFSDC comparados com os custos logísticos.	88
A.1	Estratégias CPLEX testadas para os modelos FRFS e FRFST.	104
A.2	Média dos resultados da estratégia CPLEX <i>default</i> (CPX1) e da melhor estratégia CPLEX (CPX15).	104
A.3	Partição de variáveis nas heurísticas <i>relax-and-fix</i> (RFX) e <i>fix-and-optimize</i> (FXO) para os modelos FRFS e FRST.	105
A.4	Melhores estratégias de solução para o modelo FRFS.	105
A.5	Melhores estratégias de solução para o modelo FRFST.	106
A.6	Formulação matemática bi-objetivo do problema de localização, distribuição e dimensionamento da frota.	107
A.7	Resultados da otimização multi-objetivo para instância M1.	114
A.8	Valores médios dos resultados das estratégias CPX1, CPX15, CPX1P e CPX15P.	116
D.1	Cidades afetadas consideradas.	121
D.2	Conjunto de depósitos considerados.	121
D.3	Características dos centros de auxílios considerados.	122
D.4	Características dos produtos considerados.	122
D.5	Características dos veículos considerados	122
D.6	Limites inferiores e superiores para o número de vítimas e afetados.	123

D.7	Classificação dos desastres.	123
E.1	Valores extremos das curvas de perfis de desempenho.	126
E.2	Resultado de CPX1 (<i>default</i>) e CPX15 (Melhor estratégia CPLEX) para o modelo FRFSMP.	127
E.3	Resultado da heurística DHIS para o modelo FRFSMP.	128
E.4	Resultado de RFX3 e DHIS+RFX3 para o modelo FRFSMP.	129
E.5	Resultado de FXO2 e DHIS+FXO2 para o modelo FRFSMP.	130
E.6	Resultado de FXO7 e DHIS+FXO7 para o modelo FRFSMP.	131
E.7	Valores WS, RP, EEV, EVPI e VSS das instâncias testadas com o modelo FRFSMP.	132
F.1	Resultado de CPX1 (<i>default</i>) e CPX15 (Melhor estratégia CPLEX) para o modelo FRFSDC.	133
F.2	Resultado da heurística DHIS para o modelo FRFSDC.	134
F.3	Resultado de RFX3 e DHIS+RFX3 para o modelo FRFSDC.	134
F.4	Resultado de FXO2 e DHIS+FXO2 para o modelo FRFSDC.	135
F.5	Resultado de FXO7 e DHIS+FXO7 para o modelo FRFSDC.	135
F.6	Soluções do modelo FRFSDC obtidas a partir do modelo FRFSMP.	136
F.7	Valores WS, RP, EEV, EVPI e VSS das instâncias testadas com o modelo FRFSDC.	136
G.1	Resultados dos modelos FRFSMP, FRFSDC, FRFSMTB e FRFSDCB para as instâncias pequenas.	138
G.2	Valor médio, desvio padrão e pior nível de serviço por produto ($S(w)$), área afetada ($S(k)$) e cenário ($S(\xi)$) para as instâncias pequenas.	139
G.3	Resultados dos modelos FRFSMP, FRFSDC, FRFSMTB e FRFSDCB para as instâncias médias.	140
G.4	Valor médio, desvio padrão e pior nível de serviço por produto ($S(w)$), área afetada ($S(k)$) e cenário ($S(\xi)$) para as instâncias médias.	141
G.5	Resultados dos modelos FRFSMP e FRFSDC para as instâncias grandes.	142
G.6	Valor médio, desvio padrão e pior nível de serviço por produto ($S(w)$), área afetada ($S(k)$) e cenário ($S(\xi)$) para as instâncias grandes.	142

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Organização do Trabalho	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	Funções objetivo dos modelos determinísticos	21
2.2	Decisões apoiadas pelos modelos determinísticos	22
2.3	Funções objetivo dos modelos de programação estocástica	27
2.4	Decisões apoiadas pelos modelos de programação estocástica	27
3	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	33
3.1	Modelo FRFSMP	36
3.2	Modelo FRFSDC	42
3.3	Modelos bi-objetivo	47
4	MÉTODOS DE SOLUÇÃO	50
4.1	Estratégias CPLEX	51
4.2	Heurísticas <i>relax-and-fix</i>	53
4.3	Heurísticas <i>fix-and-optimize</i>	55
4.4	Heurística de decomposição em duas fases	56
5	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	59
5.1	Descrição dos dados	59
5.2	Geração de cenários	61
5.3	Custos de privação	63
5.4	Instâncias propostas	65
5.5	Desempenho das estratégias de solução: modelo FRFSMP	68
5.5.1	Resultados das estratégias CPLEX: modelo FRFSMP	68
5.5.2	Resultados das heurísticas <i>relax-and-fix</i> : modelo FRFSMP	71

5.5.3	Resultados das heurísticas <i>fix-and-optimize</i> : modelo FRFSMP	72
5.5.4	Resultados das heurísticas de decomposição híbridas: modelo FRFSMP	74
5.6	Desempenho das estratégias de solução: modelo FRFSDC	77
5.7	Comparação das soluções dos modelos FRFSMP e FRFSDC	80
5.7.1	Comparação do modelo FRFSDC com o modelo FRFSMP	80
5.7.2	Comparação dos modelos bi-objetivo com os modelos mono-objetivo	82
5.8	Análise de EVPI e VSS	85
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	89
	Referências Bibliográficas	90
A	MODELOS MATEMÁTICOS PRELIMINARES	99
A.1	Modelo FRFS (<i>Facility routing with fleet sizing decisions under uncertainty</i>)	99
A.2	Modelo FRFST (<i>Facility routing with fleet sizing decisions and travel times under uncertainty</i>)	101
A.3	Desempenho das estratégias CPLEX na solução dos modelos FRFS e FRFST	103
A.4	Desempenho das estratégias <i>relax-and-fix</i> e <i>fix-and-optimize</i> na solução dos modelos FRFS e FRFST	104
A.5	Análise bi-objetivo dos modelos FRFS e FRFST	107
A.5.1	Conjunto Pareto-ótimo	108
A.5.2	Resultado da otimização bi-objetivo	110
A.6	Testes de otimização em paralelo	115
B	MODELO FRFSMP	117
C	MODELO FRFSDC	119
D	DESCRIÇÃO DOS DADOS	121
D.1	Classificação de desastres	121
D.2	Geração de cenários	123
E	RESULTADOS COMPUTACIONAIS DO MODELO FRFSMP	125
F	RESULTADOS COMPUTACIONAIS DO MODELO FRFSDC	133
G	COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS FRFSMP E FRFSDC	137

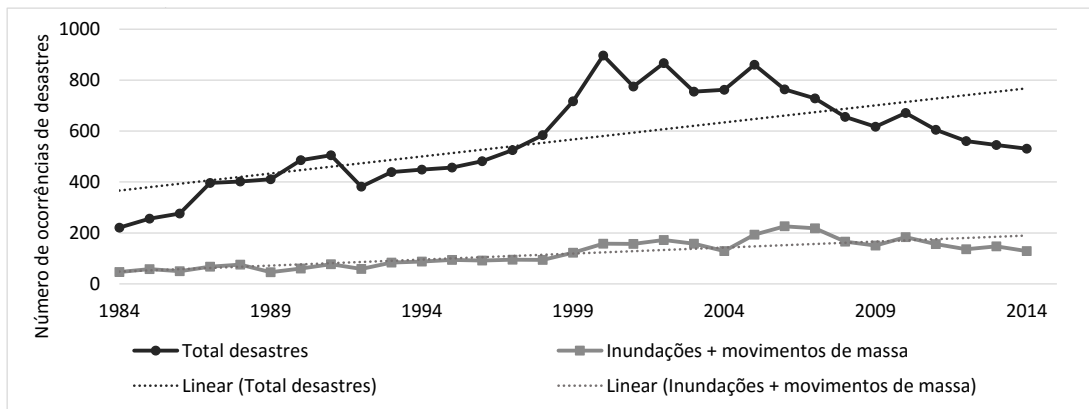
Capítulo 1

INTRODUÇÃO

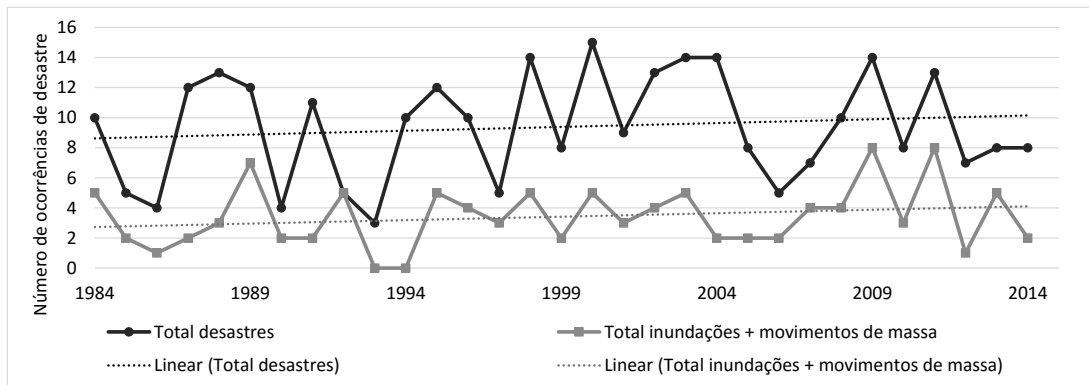
A cada ano, centenas de desastres ambientais (terremotos, enchentes, furacões, etc.) ou ocasionados pelo homem (ataques terroristas, vazamentos químicos, etc) ocorrem no mundo, deixando milhares de vítimas fatais e milhões de afetados. Segundo dados do *Emergency Events Database* (EM-DAT, 2015), os últimos 30 anos contabilizaram, aproximadamente, 17.361 desastres ao redor do mundo, totalizando mais de 3 milhões de vítimas fatais, 5,9 bilhões de afetados e US \$2,5 bilhões de dólares em danos econômicos. No mesmo período no Brasil, houve 291 desastres, com 10.582 vítimas fatais, 50,8 milhões de pessoas afetadas e US \$17,7 milhões de dólares em danos econômicos. Nesse período de 30 anos, a média de ocorrências é de 578 desastres por ano no mundo e 10 desastres por ano no Brasil. Inundações e movimentos de massa (e.g., avalanche, fluxos de detritos, deslizamento de terra e desabamento de pedras), desastres recorrentes no Brasil, representam uma parcela relevante dentro do total de desastres no Brasil e no mundo. De fato, segundo os registros do EM-DAT (2015), 20,98% dos desastres mundiais dos últimos 30 anos estão nesta categoria. No Brasil, essa porcentagem aumenta para 36,42%. As informações dos dados históricos também sugerem que há uma tendência de aumento do número de desastres para os próximos anos, conforme ilustram as Figuras 1.1(a) e 1.1(b). Note que o número total de desastres que acontecem no Brasil está fortemente influenciado pelo número de inundações e movimentos de massa.

Frente a essa tendência mundial, organizações governamentais e não governamentais devem se preocupar em mitigar o impacto dos desastres sobre as populações vulneráveis. No contexto brasileiro, os órgãos do Sistema Nacional de Defesa Civil (SINDEC) são os responsáveis pela gestão de emergência em situações de desastres. Tais órgãos devem agir em prol do bem-estar dos cidadãos na redução do impacto dos desastres (VALENCIO, 2010). Porém, o número de vítimas fatais, afetados e os danos econômicos causados por esses eventos nos últimos anos têm evidenciado a dificuldade dessas organizações em responder eficientemente ao seu impacto,

mesmo quando um tipo de desastre é recorrente em uma determinada região. No desastre da região Serrana do Rio de Janeiro em 2011 (RIO DE JANEIRO, 2011), por exemplo, não existiam planos de contingências bem estruturados socializados com a população, não houve coordenação dos diferentes atores envolvidos na fase inicial de resposta, e em alguns casos, a imprensa chegou primeiro em lugares que a defesa civil considerava inacessíveis (BUSCH; AMORIM, 2011). Tais exemplos mostram a dificuldade na gestão de desastres por parte desses órgãos, que, em algumas situações, imputam a responsabilidade dos acontecimentos sobre os próprios afetados, que residem em zonas de maior densidade populacional, em moradias mal construídas, em condições de pobreza e em terrenos mais expostos ao risco (VALENCIO, 2010). Claramente, parte das deficiências observadas na gestão de desastres deve-se à complexidade e imprevisibilidade desses eventos.



(a) No mundo.



(b) No Brasil.

Figura 1.1: Ocorrências de desastres nos últimos 30 anos. Fonte: Adaptado de EM-DAT (2015).

O ciclo de vida das operações de desastre está ligado à temporalidade desse tipo de evento. Existem operações realizadas antes da ocorrência do desastre (pré-desastre) e operações realizadas após o início do desastre (pós-desastre). Na fase pré-desastre, são realizadas operações de

mitigação e preparação e, na fase pós-desastre, operações de resposta e recuperação. De acordo com Altay e Green (2006), na mitigação, são propostas medidas para prevenir a ocorrência do desastre ou reduzir o impacto, caso este ocorra; a preparação envolve as ações para organizar a comunidade e os recursos para uma resposta mais eficiente ante o desastre; na resposta, são realizadas ações para preservar a vida dos afetados, o ambiente e a estrutura social, econômica e política da comunidade; e a recuperação envolve as ações tomadas a longo prazo para restaurar a comunidade em condições similares às anteriores ao desastre.

As decisões em operações pré-desastre incluem, principalmente, localização de facilidades, pré-posicionamento de estoque, desenho e socialização de planos de emergência, proteção da infraestrutura necessária para os serviços de emergência, dimensionamento da frota, entre outras. As decisões em operações pós-desastre incluem localização de facilidades provisórias, dimensionamento de frota, definição de níveis de estoques, transporte/distribuição de suprimentos, implementação de planos de emergência, resgate e evacuação de afetados, entre outras. O dimensionamento da frota no pré-desastre consiste em determinar a frota de veículos necessária para a possível distribuição dos suprimentos, enquanto que no pós-desastre refere-se a utilização efetiva desses veículos.

A integração das decisões de localização e distribuição/transporte compõe uma importante área de estudo em logística, que tem atraído a atenção de acadêmicos e tomadores de decisões. Na logística tradicional, existe um *trade-off* claro entre localização e transporte em termos do custo total da rede; i.e., descentralizar uma quantidade maior de facilidades ao longo da rede na tentativa de conseguir melhores rotas, o que reduz o custo variável de transporte, mas eleva os custos fixos de abertura e operação das facilidades. Na logística humanitária, esse *trade-off* é ainda mais complexo, pois não necessariamente existe coordenação entre os diversos atores da rede humanitária para que a descentralização seja efetiva na redução do tempo de resposta dos planos emergenciais, por exemplo. Além disso, em muitas situações, a rede está colapsada e muitas rotas podem estar bloqueadas para alguns tipos de transporte, fazendo com que a decisão de centralizar as facilidades emergenciais dificulte ainda mais o acesso às vítimas, especialmente às aquelas em lugares isolados.

Note que a seleção dos tipos de transporte adequados para cada tipo (ou impacto) de desastre é fundamental para aumentar a cobertura da distribuição de *commodities* e, conseqüentemente, melhorar o nível de serviço. Entretanto, poucos pesquisadores se preocuparam em integrar o dimensionamento de frota às decisões de localização e distribuição. Por um lado, superestimar o número e os tipos de veículos necessários para realizar o transporte incorre em custos excessivos e, conseqüentemente, à escassez de recursos que poderiam ser empregados em outras atividades de

pré- e/ou pós-desastre. Por outro lado, subestimar a frota de veículos em termos de quantidade e/ou tipo, pode causar uma distribuição ineficiente dos suprimentos, como o desbalanceamento da distribuição entre as diversas áreas afetadas, dificuldade em atingir regiões isoladas ou mais colapsadas, o que deteriora os níveis de serviço.

A dificuldade em antecipar o desastre e o seu impacto dificulta ainda mais as decisões de localização, distribuição e frota. Com recursos limitados, os órgãos que fazem a gestão de desastres devem responder da melhor maneira possível a qualquer que seja a consequência desses eventos. Isso sugere que o desenvolvimento de ferramentas de apoio às decisões em desastres deve considerar as incertezas que são inerentes a essas situações. A programação estocástica de dois estágios surge como uma maneira “natural” para modelar e resolver problemas em logística humanitária, sob a motivação de que os estágios podem ser relacionados ao ciclo de vida dos desastres (METE; ZABINSKY, 2010). O primeiro estágio pode ser visto como a fase de preparação, em que potenciais centros de auxílio, depósitos e veículos são selecionados, independentemente da realização das variáveis aleatórias. No segundo estágio, são determinadas as decisões de resposta ao desastre, i.e, as rotas que serão percorridas, quantos veículos serão, de fato, necessários e a efetiva distribuição de produtos.

Segundo Holguín-Veras et al. (2013), há três aspectos importantes que devem ser considerados para modelar de forma adequada operações em situações de resposta a desastres: os efeitos inter-temporais, a convergência de materiais e o sofrimento das vítimas. Os efeitos intertemporais estão relacionados ao impacto das operações de distribuição de suprimentos ao longo dos períodos. Tais efeitos podem ser mitigados com a adoção de modelos dinâmicos ou multi-períodos. A convergência de materiais relaciona-se ao fluxo de produtos até as áreas afetadas, considerando, por exemplo, a priorização de alguns produtos e/ou a proibição de outros que podem atrapalhar as operações. Finalmente, o sofrimento das vítimas é um aspecto que deveria ser determinante no planejamento das operações de resposta, uma vez que pessoas que levam mais tempo sem receber os produtos tem um sofrimento maior pela falta dos mesmos. Porém, Holguín-Veras et al. (2013) afirmam que o sofrimento das vítimas não está sendo considerado de forma adequada nos modelos de operações de resposta na literatura, principalmente pela dificuldade existente em conciliar custos logísticos com objetivos que tentam mensurar o sofrimento humano. Isto motiva a utilização de custos sociais, definido segundo os mesmos autores como a soma dos custos logísticos com os custos de privação. Custos logísticos referem-se aos custos da equipe humanitária nas operações de distribuição, estoque, localização, entre outros para transportar os produtos até as vítimas. O termo “custos de privação” pode ser definido como uma medida do valor econômico do sofrimento humano causado pela falta de produtos ou serviços (HOLGUÍN-VERAS et al., 2013).

Custos sociais conduzem à implementação de estratégias de entrega de suprimentos de forma mais equitativa para todos os segmentos da população, em relação a outras funções objetivo.

As principais contribuições são resumidas a seguir: (i) são desenvolvidos modelos de programação estocástica de dois estágios para o problema integrado de localização, distribuição e dimensionamento de frota, num contexto multi-período, multi-produto e multi-modal, e ainda considerando incertezas inerentes às situações de desastres. Além disso, são consideradas como variáveis aleatórias a demanda, a proporção de estoque utilizável, o suprimento e a disponibilidade das rotas. (ii) São considerados custos sociais na função objetivo via custos de privação. (iii) Os modelos são analisados com dados baseados nos dados reais do megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011 (inundações e movimentos de massa), desastre que se destacou por ser considerada a pior calamidade registrada no Brasil nos últimos anos (RIO DE JANEIRO, 2011). (iv) Finalmente, são explorados métodos de solução do tipo *relax-and-fix* e *fix-and-optimize* para resolver instâncias de grande porte. Adicionalmente, é desenvolvida uma heurística de decomposição de duas fases específica para o problema.

1.1 Organização do Trabalho

O restante desse trabalho está organizado da seguinte maneira.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica dos principais trabalhos na literatura que abordam os problemas de localização, distribuição de suprimentos e dimensionamento de frota em situações de desastres. O Capítulo 3 apresenta a descrição do problema e as formulações matemáticas propostas. O Capítulo 4 discute os métodos de solução desenvolvidos. Como métodos de solução são utilizadas diferentes estratégias CPLEX e heurísticas de decomposição e programação matemática. O Capítulo 5 apresenta a descrição das instâncias e os resultados computacionais. É apresentada a descrição do caso estudado e os resultados computacionais da implementação das diferentes estratégias CPLEX e heurísticas. O Capítulo 6 apresenta as considerações finais e os próximos passos. Finalmente, nos apêndices são apresentados os modelos matemáticos preliminares e resultados computacionais e informações adicionais das características das instâncias.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA

Diversos trabalhos mostram a evolução da aplicação de técnicas e modelos matemáticos no campo da logística humanitária (ALTAY; GREEN, 2006; TORRE; DOLINSKAYA; SMILOWITZ, 2012; ORTUÑO et al., 2013; GALINDO; BATA, 2013b; LIBERATORE et al., 2013; ZHENG; CHEN; LING, 2014; CAVALCANTI et al., 2014; ANAYA-ARENAS; RENAUD; RUIZ, 2014).

Altay e Green (2006) e Galindo e Batta (2013b) revisaram as características dos principais trabalhos publicados na área de pesquisa operacional relacionados à gestão de desastres, identificando as principais contribuições na literatura, os problemas que têm sido negligenciados e o potencial de estudo nessa área. Ambos os trabalhos apontam que, dentre os desafios de pesquisas futuras, têm-se a introdução de mais estudos aplicados, a utilização de análise estatística para estimar as incertezas inerentes das situações de desastres, e o aprofundamento de estudos que combinem várias áreas disciplinares.

Torre, Dolinskaya e Smilowitz (2012) revisaram os modelos aplicados a operações de transporte, enfatizando a necessidade de entender os problemas da gestão de desastres de uma perspectiva prática. Igualmente, Cavalcanti et al. (2014) revisaram os modelos aplicados à distribuição de suprimentos, com o objetivo de entender os critérios de desempenho empregados na definição de funções objetivo. Identificaram 18 critérios de desempenho, dentro dos quais os mais utilizados foram tempo de resposta, custos de operação e atraso no atendimento da demanda. Ortuño et al. (2013), Anaya-Arenas, Renaud e Ruiz (2014) realizaram uma revisão sobre a utilização de modelos matemáticos para auxiliar na tomada de decisões no processo de respostas a desastres. Os autores observaram que não é frequente encontrar modelos que combinam várias decisões, mesmo que, na prática, os tomadores de decisões têm que enfrentar a coordenação de várias operações distintas em operações de desastres. Similarmente, Zheng, Chen e Ling (2014) realizaram um análise dos problemas mais comuns em operações humanitárias e os algoritmos evolucionários que têm sido aplicados a esses problemas. Os autores notaram um aumento na aplicação de algoritmos

evolucionários nos últimos anos, porém, ainda longe de atingir o potencial de estudo nessa área.

2.1 Funções objetivo dos modelos determinísticos

A definição dos objetivos nos modelos de gestão a desastres é uma das principais diferenças entre a logística humanitária e a logística comercial. Muitos dos modelos determinísticos não consideram de forma explícita custos logísticos, concentrando-se em objetivos de atendimento à demanda. A maioria desses modelos são mono-objetivo e estão orientados a minimizar o atraso na entrega de produtos nas áreas afetadas (OZDAMAR; EKINCI; KUCUKYAZICI, 2004; YI; KUMAR, 2007; YI; OZDAMAR, 2007; AFSHAR; HAGHANI, 2012), maximizar o atendimento da demanda (JIA; ORDÓNEZ; DESSOUKY, 2007; DE ANGELIS et al., 2007; MURALI; ORDÓNEZ; DESSOUKY, 2012), minimizar a distância (WIDENER; HORNER, 2011), ou minimizar o tempo de resposta (KONGSOMSAKSAKUL; YANG; CHEN, 2005; HOUMING et al., 2008; SONG; HE; ZHANG, 2009; NA; ZHI, 2009; OZDAMAR, 2011; BERKOUNE et al., 2012; CAMACHO-VALLEJO et al., 2014). Em Yi e Kumar (2007) e Yi e Ozdamar (2007) os autores trataram do problema de evacuação e transporte de feridos, penalizando na função objetivo o número de vítimas feridas não atendidas.

Dos modelos que não consideram explicitamente os custos logísticos, apenas dois propuseram uma abordagem multi-objetivo. Nolz et al. (2010) apresentaram um modelo bi-objetivo que minimiza a distância percorrida pelos veículos e a distância entre os centros de auxílio e as áreas afetadas. Liberatore et al. (2012) por sua vez propuseram um modelo hierárquico constituído por vários critérios, como a minimização do tempo máximo de chegada nos nós de demanda, a maximização da demanda total atendida, além de critérios de segurança e confiabilidade.

Vários modelos que propõem minimizar os custos logísticos das operações humanitárias são modelos mono-objetivo que misturam numa mesma função objetivo custos logísticos e humanitários, dando uma penalidade maior ao objetivo humanitário. Esses modelos consideram, na maioria dos casos, custos de transporte em conjunto com penalidades por demanda insatisfeita (BALCIK; BEAMON; SMILOWITZ, 2008; LIN et al., 2012, 2012; CLARK; CULKIN, 2013), ou custos de privação (PÉREZ-RODRÍGUEZ; HOLGUÍN-VERAS, 2015). Em Lin et al. (2012), os autores também consideraram uma penalidade para a máxima diferença entre os níveis de serviço de duas áreas afetadas. Clark e Culkin (2013) acrescentaram ao custo de transporte os custos de estoque e contratação de veículos, este último considerado em alguns modelos mono-objetivo em conjunto com a minimização do tempo de resposta (BARBAROSOGLU; ÖZDAMAR; ÇEVİK, 2002; WOHLGEMUTH; OLORUNTOBA; CLAUSEN, 2012). Galindo e Batta (2013a) consideraram, além do custo de transporte, os custos de localização e estoque.

Finalmente, são vários os autores que propuseram modelos multi-objetivos considerando que os custos logísticos não devem ser integrados a outros custos orientados ao atendimento da demanda. Alguns desses autores desenvolveram modelos bi-objetivo para minimizar o custo logístico total e, simultaneamente, maximizar o atendimento da demanda (VISWANATH; PEETA, 2003; TZENG; CHENG; HUANG, 2007; TANG et al., 2009; RATH; GUTJAHR, 2011) ou minimizar o custo logístico total e a demanda insatisfeita (ROTTKEMPER; FISCHER; BLECKEN, 2012). Em Vitoriano et al. (2011), foi desenvolvido um modelo de programação por metas que considerou na função objetivo critérios de custo, tempo de operação, equidade, prioridade, confiabilidade e segurança, similar aos objetivos utilizados em Liberatore et al. (2012). Lin et al. (2011), por sua vez, propuseram um modelo multi-objetivo com objetivos similares aos propostos em Lin et al. (2012).

2.2 Decisões apoiadas pelos modelos determinísticos

Nos trabalhos revisados, foram identificadas 5 decisões principais: localização de facilidades, transporte de suprimentos, dimensionamento de frota, definição de níveis de estoque e evacuação de vítimas. Porém, poucos autores têm considerado de forma integrada essas decisões.

Alguns autores propuseram modelos para apoiar decisões de forma isolada, focados apenas no problema de localização de facilidades, armazéns, albergues, centros de auxílio e hospitais (JIA; ORDÓNEZ; DESSOUKY, 2007; WIDENER; HORNER, 2011). Em outros trabalhos, o foco foi apenas no transporte de suprimentos (VISWANATH; PEETA, 2003; TANG et al., 2009).

A maioria dos modelos determinísticos consideram duas ou três decisões de forma integrada. Entre as decisões que são comumente integradas, têm-se a localização de facilidades com o transporte de produtos (TZENG; CHENG; HUANG, 2007; GALINDO; BATTÀ, 2013a), a evacuação de vítimas (KONGSOMSAKSAKUL; YANG; CHEN, 2005) ou o pré-posicionamento de estoques (GALINDO; BATTÀ, 2013a; MURALI; ORDÓNEZ; DESSOUKY, 2012). Liberatore et al. (2012) integraram a distribuição de produtos com operações de recuperação dos arcos da rede.

Alguns autores consideraram que a definição do fluxo de produtos deve estar vinculada à decisão de definir os modais que devem transportar esses produtos, portanto integraram tal problema ao dimensionamento da frota. Nessa linha, encontram-se os seguintes trabalhos: Ozdamar, Ekinici e Kucukyazici (2004), DE ANGELIS et al. (2007), Houming et al. (2008), Na e Zhi (2009), Vitoriano et al. (2011), Lin et al. (2011), Wohlgemuth, Oloruntoba e Clausen (2012), Berkoune et al. (2012) e Camacho-Vallejo et al. (2014). A semelhança entre esses trabalhos é o desenvolvimento de modelos matemáticos para definir o fluxo de produtos entre os diferentes nós

da rede e os veículos nos que devem ser transportados esses produtos, sem considerar o problema de localização de facilidades. De forma similar, Yi e Kumar (2007) e Ozdamar (2011) integraram o problema de distribuição e dimensionamento da frota, e decisões referentes ao transporte e evacuação de vítimas das áreas afetadas. Em Barbarosoglu, Özdamar e Çevik (2002), os autores desenvolveram modelos para dimensionar frotas de helicópteros, alocar os pilotos aos helicópteros e definir as rotas dos mesmos. Balcik, Beamon e Smilowitz (2008), Rottkemper, Fischer e Blecken (2012), Clark e Culkin (2013) e Pérez-Rodríguez e Holguín-Veras (2015), por sua vez, integraram as decisões de transporte e dimensionamento da frota com a decisão de definir os níveis de estoque.

Finalmente, poucos trabalhos que consideraram, simultaneamente, decisões de localização, distribuição e dimensionamento da frota. Entre eles encontram-se Yi e Ozdamar (2007), Nolz et al. (2010), Rath e Gutjahr (2011), Lin et al. (2012) e Afshar e Haghani (2012). Em Yi e Ozdamar (2007) os autores consideraram adicionalmente o transporte e evacuação de vítimas. Em Song, He e Zhang (2009), por outro lado, os autores não consideraram o fluxo de suprimentos, apenas o transporte e evacuação de vítimas das áreas afetadas.

A Tabela 2.1 resume as principais funções objetivo dos modelos determinísticos revisados e as principais características desses modelos. A seta nas colunas das funções objetivo indica se o objetivo é minimização (\downarrow) ou maximização (\uparrow). Dentre os objetivos mais utilizados, está o atendimento da demanda, com 16 modelos considerando objetivos relacionados a diminuir a demanda insatisfeita ou aumentar a demanda satisfeita. Outros objetivos bastante utilizados são o custo e tempo de transporte com 12 e 14 modelos utilizando esses objetivos, respectivamente. Os custos de localização, contratação de veículos e privação são os menos utilizados. São poucos os autores que se preocuparam em minimizar o número de veículos utilizados e as facilidades que são abertas nas operações de resposta a desastres. Embora esses objetivos não sejam a prioridade em situações de desastre, deveriam ser considerados para obter soluções mais eficientes, sobretudo em situações com escassez de recursos. Apenas um trabalho utilizou custos de privação (PÉREZ-RODRÍGUEZ; HOLGUÍN-VERAS, 2015), portanto poucos autores tem considerado o crescimento do sofrimento das vítimas a medida que aumenta o tempo sem receber os suprimentos. Note que nenhum dos modelos considerou os custos de localização, contratação ou privação de forma simultânea, como considerados nesse presente trabalho. A maioria dos autores propuseram modelos mono-objetivo, mesmo quando foram considerados objetivos aparentemente conflitantes.

Na Tabela 2.1 pode ser observado também que, dos 31 trabalhos que desenvolveram modelos determinísticos, apenas 9 consideraram multi-períodos, multi-produtos, frota de veículos e tempo de transporte de forma simultânea, dos quais 7 consideraram a frota como heterogênea. Portanto

são poucos os modelos com características similares às consideradas nesse trabalho. Como discutido no Capítulo 1, em logística humanitária os modelos multi-períodos, multi-produtos e que levam em conta o tempo das operações humanitárias são essenciais para considerar os efeitos inter-temporais, a convergência de materiais e o sofrimento das vítimas.

A Tabela 2.2 resume as principais decisões dos modelos determinísticos e os métodos de solução utilizados para resolver esses modelos. Note que só 5 trabalhos integraram as decisões de localização, distribuição e dimensionamento da frota (YI; OZDAMAR, 2007; NOLZ et al., 2010; RATH; GUTJAHR, 2011; AFSHAR; HAGHANI, 2012; LIN et al., 2012) dos quais apenas 2 (YI; OZDAMAR, 2007; AFSHAR; HAGHANI, 2012) consideraram frota heterogênea. Porém, nenhum deles considerou custos de contratação ou privação. Assim, nesses trabalhos o dimensionamento da frota se baseia unicamente no custo e/ou tempo de transporte e não é considerada a reutilização dos veículos, a menos que os veículos sejam escassos e seja estritamente necessária sua reutilização. Portanto, além de não considerar as incertezas, são poucos os modelos determinísticos com características similares às dos modelos propostos nesse trabalho.

Em relação aos métodos de solução, 22 dos trabalhos utilizaram o método exato *Branch-and-cut* de *solvers* de otimização para resolver os problemas ou os subproblema quando utilizaram heurísticas. Quando o método *branch-and-cut* não encontrou boas soluções em pouco tempo, heurísticas e/ou meta-heurísticas específicas do problema foram desenvolvidas. Entre as heurísticas mais utilizadas estão o algoritmo genético, a heurística *locate-allocate*, a relaxação lagrangiana e o algoritmo NSGA-II. O algoritmo genético e a relaxação lagrangiana são métodos amplamente discutidos na literatura. A heurística *locate-allocate* consiste em descompor o problema em duas fases. Na primeira é realizada a localização das facilidades e na segunda a alocação da demanda às facilidades. O algoritmo NSGA-II é uma extensão do algoritmo genético para problemas de otimização multi-objetivo. Nenhum dos trabalhos utilizou técnicas heurísticas do tipo *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*, as quais serão utilizadas para resolver os modelos propostos nesse trabalho.

Tabela 2.1: Funções objetivo e principais características dos modelos determinísticos em operações de resposta a desastres.

Referência	Característica					Função objetivo						Outro objetivo ¹		
	Multi - período	Multi - Produto	Prata	Lead time	Objetivo	↓ Custos			↓ Tempo	↑ Demanda atendida				
						Localização	Estoque	Transporte			Contração		Atração	Privatização
Barbarosoglu, Özdamar e Çevik (2002)		X	Hete.	X	Mono			X			X	X		
Viswanath e Peeta (2003)		X			Multi			X				X		
Ozdamar, Ekinci e Kucukyazici (2004)	X	X	Hete.	X	Mono				X					
Kongsomsaksakul, Yang e Chen (2005)				X	Mono						X			
Jia, Ordóñez e Dessouky (2007)					Mono							X		
DE ANGELIS et al. (2007)	X		Hete.	X	Mono							X		
Tzeng, Cheng e Huang (2007)	X	X	Homo.	X	Multi	X		X			X			
Yi e Kumar (2007)	X	X	Hete.	X	Mono				X			X		
Yi e Ozdamar (2007)	X	X	Hete.	X	Mono				X			X		
Balcik, Beamon e Smilowitz (2008)	X		Hete.	X	Mono			X						
Houming et al. (2008)		X	Hete.	X	Mono						X			
Song, He e Zhang (2009)			Hete.	X	Mono						X			
Na e Zhi (2009)			Hete.	X	Mono						X			
Tang et al. (2009)	X				Multi			X				X		
Nolz et al. (2010)			Homo.		Multi						X	X		
Vitoriano et al. (2011)			Hete.	X	Multi			X			X	X		
Lin et al. (2011)	X	X	Hete.	X	Multi			X	X		X	X		
Widener e Horner (2011)					Mono							X		
Ozdamar (2011)		X	Homo.	X	Mono						X			
Rath e Gutjahr (2011)			Homo.	X	Multi	X		X			X	X		
Lin et al. (2012)	X	X	Homo.	X	Mono			X	X			X		
Rotfinkper, Fischer e Blecken (2012)	X		Hete.		Multi			X	X			X		
Afshar e Haghani (2012)	X	X	Hete.	X	Mono				X					
Murali, Ordóñez e Dessouky (2012)					Mono							X		
Wohlgemuth, Oloruntoba e Clausen (2012)			Homo.	X	Mono			X ²			X			
Berkoune et al. (2012)		X	Hete.	X	Mono						X			
Liberatore et al. (2012)				X	Multi						X	X		
Clark e Culkin (2013)	X	X	Hete.	X	Mono			X	X ²	X				
Galindo e Batta (2013a)					Mono	X		X				X		
Camacho-Vallejo et al. (2014)		X	Hete.	X	Mono						X			
Pérez-Rodríguez e Holguín-Veras (2015)	X	X	Hete.	X	Mono			X						
Sumário	13	15	Hete (17), Homo (6)	23	Mono (22), Multi (9)	3	4	12	3	9	1	14	7	13

¹ Custo de alocação de pilotos; custo de aquisição; distância; número de feridos sem atendimento; diferença entre o nível de serviço nos pontos de demanda; máxima probabilidade de saqueio na distribuição, probabilidade da distribuição ser completada sem sofrer nenhum ataque, mínima probabilidade de conseguir atravessar um arco, probabilidade de conseguir atravessar com sucesso todos os arcos.
² O objetivo de minimizar o número de veículos foi considerado como um custo de contratação.

Tabela 2.2: Decisões apoiadas pelos modelos determinísticos em operações de resposta a desastres e métodos de solução.

Referência	Decisões										Tipo de desastre
	Localização	Dimensionamento da frota	Transporte de suprimentos	Evacuação de feridos	Níveis de estoque	Outra decisão ¹	Método de Solução ²				
Barbarosoglu, Özdamar e Çevik (2002)		X	X	X		X	<i>Branch-and-cut</i> ; heurística	Terremoto			
Viswanath e Peeta (2003)			X				<i>Branch-and-cut</i>	Terremoto			
Özdamar, Elkinç e Kucukyazıcı (2004)		X	X				<i>Branch-and-cut</i> ; relaxação lagrangiana	Terremoto			
Kongsomsaksakul, Yang e Chen (2005)	X			X			Algoritmo genético	Inundação			
Jia, Ordóñez e Dessouky (2007)	X						Algoritmo genético; heurística <i>locate-allocate</i> ; relaxação lagrangiana	Ataque com antraz			
DE ANGELIS et al. (2007)		X	X				<i>Branch-and-cut</i>	–			
Tzeng, Cheng e Huang (2007)	X		X				<i>Branch and bound</i>	Terremoto			
Yi e Kumar (2007)		X	X	X			<i>Branch-and-cut</i> ; Otimização com colônia de formigas	–			
Yi e Özdamar (2007)	X	X	X	X	X		<i>Branch-and-cut</i> ; heurística	Terremoto			
Balcik, Beamon e Smilowitz (2008)		X	X		X		<i>Branch-and-cut</i>	–			
Houming et al. (2008)		X	X				Algoritmo genético	–			
Song, He e Zhang (2009)	X	X	X	X			Algoritmo genético; algoritmo genético híbrido	Furacão			
Na e Zhi (2009)		X	X				Algoritmo genético	–			
Tang et al. (2009)			X				<i>Branch and bound</i>	Terremoto			
Nolz et al. (2010)	X	X	X				Algoritmo NSGA-II	Terremoto			
Vitoriano et al. (2011)		X	X				<i>Branch-and-cut</i>	Terremoto			
Lin et al. (2011)		X	X				<i>Branch-and-cut</i> ; algoritmo genético; heurística	–			
Widener e Horner (2011)	X						<i>Branch-and-cut</i>	Furacão			
Özdamar (2011)		X	X	X			<i>Branch-and-cut</i>	Terremoto			
Rath e Gutjahr (2011)	X	X	X				Math-heurística; Algoritmo NSGA-II	Terremoto			
Lin et al. (2012)	X	X	X			X	<i>Branch-and-cut</i> ; heurística	Terremoto			
Rottkemper, Fischer e Blecken (2012)		X	X				<i>Branch-and-cut</i> ; heurística	Epidemia de malária			
Alfshar e Haghani (2012)	X	X	X				<i>Branch-and-cut</i>	Furacão			
Murali, Ordóñez e Dessouky (2012)	X				X ³	X	Heurística <i>locate-allocate</i> (localloc)	Ataque com antraz			
Wohlgemuth, Oloruntoba e Clausen (2012)		X	X				<i>Branch-and-cut</i> ; busca tabu	–			
Berkoune et al. (2012)		X	X				<i>Branch-and-cut</i> ; algoritmo genético	–			
Liberatore et al. (2012)			X			X	<i>Branch-and-cut</i>	Terremoto			
Clark e Cullin (2013)		X	X		X		<i>Branch-and-cut</i>	Terremoto			
Galindo e Batta (2013a)	X		X		X ³		<i>Branch-and-cut</i> ; heurística	Furacão			
Camacho-Vallejo et al. (2014)		X	X				<i>Branch-and-cut</i>	Terremoto			
Pérez-Rodríguez e Holguín-Veras (2015)		X	X		X ³		Heurística	–			
Sumário	12	22	26	6	6	4		Terremoto (14); furacão (4); ataque com antraz (2); inundação (1); epidemia (1)			

¹ Alocação de pilotos; alocação da demanda; recuperação dos arcos de transporte.

² Foi assumido que os autores que utilizaram o *solver* CPLEX utilizaram por *default* o método *branch-and-cut*, a não ser que especificarem o método utilizado.

³ Decisão de pré-posicionamento de estoque.

2.3 Funções objetivo dos modelos de programação estocástica

Diferente dos modelos determinísticos, nos modelos de programação estocástica, a maioria dos autores consideraram custos logísticos na função objetivo. Apenas três trabalhos não consideraram tais custos. Nesses trabalhos o objetivo foi minimizar a demanda insatisfeita (FAN; LIU, 2008; DURAN; GUTIERREZ; KESKINOC AK, 2011), minimizar o tempo de resposta (DURAN; GUTIERREZ; KESKINOC AK, 2011) e maximizar a cobertura da demanda (BALCIK; BEAMON, 2008). Balcik e Beamon (2008) consideraram custos logísticos via restrição de orçamento, e não na função objetivo.

Muitos autores combinaram numa mesma função objetivo custos de localização, estoque, transporte e penalidade por demanda insatisfeita simultaneamente (CHANG; TSENG; CHEN, 2007; RAWLS; TURNQUIST, 2010; BOZORGI-AMIRI et al., 2011; LI; JIN; ZHANG, 2011; DÖYEN; ARAS; BARBAROSOGLU, 2011; RAWLS; TURNQUIST, 2012; NOYAN, 2012; BATAGLIN; ALEM, 2014). Bataglin e Alem (2014) consideraram, adicionalmente, custos de contratação. Barbarosoglu e Arda (2004), Lodree, Ballard e Song (2012) e Kelle, Schneider e Yi (2014) também propuseram modelos mono-objetivo para minimizar a penalidade por demanda insatisfeita e custos de estoque e transporte, sem considerar custos de localização, enquanto que Junior, Leiras e Yoshizaki (2013) minimizaram os custos de localização, transporte e atraso, mas não consideraram custos de estoque. Mete e Zabinsky (2010) e Ahmadi, Seifi e Tootooni (2015) propuseram modelos mono-objetivo para minimizar o custo de localização, penalidade por demanda insatisfeita e tempo de transporte.

Poucos são os modelos multi-objetivos de programação estocástica desenvolvidos para apoiar decisões na gestão de desastre. Salmeron e Apte (2010) desenvolveram um modelo bi-objetivo visando minimizar o atraso na entrega de produtos e o número de vítimas feridas sem atendimento. Bozorgi-Amiri, Jabalameli e AL-E-HASHEM (2013), por outro lado, desenvolveram um modelo multi-objetivo com objetivos similares aos propostos em Bozorgi-Amiri et al. (2011). Mais recentemente, Rath, Gendreau e Gutjahr (2015) propuseram um modelo bi-objetivo para maximizar o atendimento da demanda e minimizar os custos de contratação, localização e transporte.

2.4 Decisões apoiadas pelos modelos de programação estocástica

Nos modelos de programação estocástica, é comum ver a integração de duas ou mais decisões. Alguns autores propuseram modelos de programação estocástica para o problema de distribuição de produtos, sem se preocupar com a localização de facilidades ou o dimensionamento da frota.

Esse é o caso de Barbarosoglu e Arda (2004) e Lodree, Ballard e Song (2012), que desenvolveram um modelo que considera o transporte de produtos e o pré-posicionamento de estoque no primeiro estágio, enquanto a distribuição de produtos é realizada no segundo estágio. Adicionalmente, Kelle, Schneider e Yi (2014) integraram a decisão de evacuação de vítimas no segundo estágio. Fan e Liu (2008), por outro lado, trataram da proteção da rede de transporte no primeiro estágio e a distribuição e desenho de redes de trânsito no segundo estágio.

Chang, Tseng e Chen (2007) desenvolveram um dos primeiros modelos de programação estocástica de dois estágios que integra as decisões de localização e distribuição de suprimentos, mas sem considerar o dimensionamento da frota. Na mesma linha, diversos autores propuseram modelos para apoiar as decisões de localização e pré-posicionamento de estoque no primeiro estágio e distribuição de suprimentos no segundo estágio (SALMAN; GUNNEC, 2007; RAWLS; TURNQUIST, 2010; RAWLS; TURNQUIST, 2012; BOZORGI-AMIRI et al., 2011; BOZORGI-AMIRI; JABALAMELI; AL-E-HASHEM, 2013; DURAN; GUTIERREZ; KESKINOCAK, 2011; NOYAN, 2012; JUNIOR; LEIRAS; YOSHIZAKI, 2013; DAVIS et al., 2013). Em Li, Jin e Zhang (2011) foram também consideradas decisões de transporte e alocação de evacuados no segundo estágio. Finalmente, em Döyen, Aras e Barbarosoglu (2011), incorporou-se decisões de operação dos centros de auxílio e alocação da demanda no segundo estágio.

Somente em 5 trabalhos foram combinadas decisões de localização, distribuição e dimensionamento de frota. Mete e Zabinsky (2010), Salmeron e Apte (2010), Ahmadi, Seifi e Tootooni (2015) e Rath, Gendreau e Gutjahr (2015) consideraram no primeiro estágio a localização de facilidades e no segundo estágio o transporte de suprimentos e dimensionamento da frota. Bataglin e Alem (2014), por outro lado, consideraram no primeiro estágio a localização e dimensionamento da frota e, no segundo estágio, o transporte de suprimentos. Salmeron e Apte (2010) acrescentaram ao problema de distribuição de suprimentos o resgate de feridos.

As principais características e funções objetivo dos modelos de programação estocástica revisados são sumarizadas na Tabela 2.3. Pode ser observado que dos 21 trabalhos revisados, nenhum considerou multi-períodos, multi-produtos, frota de veículos e tempo de transporte de forma simultânea. Apenas Rawls e Turnquist (2012), Bataglin e Alem (2014) consideraram contextos multi-períodos, porém, Bataglin e Alem (2014) não consideraram tempo de transporte e Rawls e Turnquist (2012) não consideraram nem tempo de transporte nem frota de veículos. Portanto, nenhum dos modelos estocásticos revisados tem as características dos modelos propostos nesse trabalho. Como já foi discutido antes, essas características são especialmente importantes em modelos de logística humanitária. Entre os objetivos mais utilizados está a minimização do custo de transporte e da demanda insatisfeita, com 15 e 19 modelos considerando esses

custos, respectivamente. Apenas 2 trabalhos (BATAGLIN; ALEM, 2014; RATH; GENDREAU; GUTJAHR, 2015) consideraram custos de contratação, dos quais em Rath, Gendreau e Gutjahr (2015) não consideraram nem contexto multi-período nem multi-produtos. Em Bataglin e Alem (2014), por outro lado, não foi considerado o tempo de transporte e o modelo que propuseram não reutiliza os veículos. Nenhum dos trabalhos considerou custo de privação, o qual vai ser considerado num dos modelos proposto nesse trabalho.

A Tabela 2.4 apresenta as principais decisões apoiadas pelos modelos estocásticos. Catorze dos trabalhos integraram a decisão de localização ao transporte de produtos, sendo 5 trabalhos (SALMERON; APTE, 2010; METE; ZABINSKY, 2010; BATAGLIN; ALEM, 2014; AHMADI; SEIFI; TOOTOONI, 2015; RATH; GENDREAU; GUTJAHR, 2015) os que consideram, além disso, o dimensionamento da frota. Porém, a maioria desses trabalho tratam de um contexto mono-período e consideram o dimensionamento da frota unicamente no segundo estágio. O único trabalho que integrou essas decisões num contexto multi-período não considera a reutilização de veículos (BATAGLIN; ALEM, 2014). Claramente, existe uma lacuna no estudo de modelos multi-períodos que integrem localização, distribuição, dimensionamento da frota e reutilização de veículos. Esses problemas são integrados nos modelos propostos nesse trabalho, além disso, considera-se o problema de dimensionamento da frota em ambos os estágios.

A Tabela 2.5 resume as variáveis aleatórias e decisões de primeiro e segundo estágio nos modelos de programação estocástica. A demanda é a fonte de incerteza mais importante, mas a disponibilidade de arcos e de suprimentos, o tempo de transporte, alguns custos e a proporção de estoque utilizável também são comuns nos trabalhos revisados. Nenhum trabalho considerou os suprimentos, a demanda, a proporção de estoque utilizável e a disponibilidade das rotas como variáveis aleatórias de forma simultânea. Em geral, as técnicas utilizadas para gerar os cenários são baseadas em dados históricos, algumas vezes em conjunto com estudos mais específicos sob o tipo de desastre, e.g., estudo de falhas de placas tectônicas em situações de terremotos (BARBAROSOGLU; ARDA, 2004; METE; ZABINSKY, 2010; BOZORGI-AMIRI; JABALAMELI; AL-E-HASHEM, 2013). Além disso, apenas dois dos trabalhos exploraram a logística humanitária em situações de enchentes e deslizamentos – desastres que têm causado grandes perdas nos últimos anos.

Em relação aos métodos de solução, é comum a utilização do método exato *branch-and-cut* para resolver os modelos. Além disso, é comum ver a utilização de heurísticas específicas para o problema em estudo e alguns métodos clássicos de decomposição, como o algoritmo *L-Shaped* (*Benders Dantzig-Wolfe*), utilizado em três dos trabalhos lidos.

Tabela 2.3: Funções objetivo e principais características dos modelos estocásticos em operações de resposta a desastres.

Referência	Característica					Função objetivo							
	Multi - período	Multi - Produto	Frota	Lead time	Objetivo	↓ Custos				↓Tempo	Outro objetivo ¹		
						Localização	Estoque	Transporte	Contratação			Atraso	Privatização
Barbarosglu e Arda (2004)		X	Hete.	Mono		X	X			X			
Chang, Tseng e Chen (2007)		X			Mono	X	X			X		X	
Fan e Liu (2008)		X		X	Mono					X		X	
Balcik e Beamon (2008)		X		X	Mono							X	
Rawls e Turnquist (2010)		X			Mono	X	X			X		X	
Salmeron e Apte (2010)		X	Hete.	X	Multi					X		X	
Metz e Zabinsky (2010)		X	Hete.	X	Mono	X				X		X	
Bozorgi-Amiri et al. (2011)		X			Mono	X	X			X		X	
Duran, Gutierrez e Keskinocak (2011)		X		X	Mono					X			
Li, Jin e Zhang (2011)		X			Mono	X	X			X			
Döyen, Aras e Barbarosglu (2011)		X		X	Mono	X	X			X			
Rawls e Turnquist (2012)	X	X			Mono	X	X			X		X	
Lodree, Ballard e Song (2012)					Mono	X	X			X		X	
Noyan (2012)		X			Mono	X	X			X			
Junior, Leiras e Yoshizaki (2013)		X			Mono	X	X			X			
Davis et al. (2013)				X	Mono		X			X		X	
Bozorgi-Amiri, Jabalameli e AL-E-HASHEM (2013)		X			Multi	X	X			X		X	
Kelle, Schneider e Yi (2014)		X			Mono	X	X			X		X	
Bataglin e Alem (2014)	X	X	Hete.		Mono	X	X			X		X	
Almadi, Seifi e Tootooni (2015)		X	Homo.	X	Mono	X	X			X		X	
Rath, Gendreau e Gutjahr (2015)		X	Hete.	X	Mono	X	X			X		X	
Sumário	2	18	Hete (5), Homo (1)	8	Mono (18), Multi (3)	13	12	15	2	19	0	3	13
Modelo FRFSMP proposto	X	X	Hete	X	Mono, Multi	X	X	X	X	X		X	X
Modelo FRFSDC proposto	X	X	Hete	X	Mono, Multi	X	X	X	X	X	X	X	X

¹ Risco médio associado com a localização de instalações, número de instalações, custo de aquisição, custo de reparação, penalidade por suprimentos danificados, atendimento da demanda.

Tabela 2.4: Decisões apoiadas pelos modelos estocástico em operações de resposta a desastres e métodos de solução.

Referência	Decisões										Método de Solução ²	Tipo de desastre
	Localização	Dimensionamento da frota	Transporte de suprimentos	Evacuação de feridos	Níveis de estoque ³	Outra decisão ¹						
Barbarosglu e Arda (2004)		X	X		X						<i>Branch-and-cut</i> ; heurística	Terremoto
Chang, Tseng e Chen (2007)	X		X		X					X	<i>Branch-and-cut</i> ; heurística	Inundação
Fan e Liu (2008)			X							X	Algoritmo <i>progressive hedging</i> (PH)	-
Balcik e Beamon (2008)	X				X					X	<i>Branch-and-cut</i>	Terremoto
Rawls e Turnquist (2010)	X		X		X						<i>Branch-and-cut</i> ; <i>Lagrangian L-shaped method</i> (LLSM)	Furacão
Salmeron e Apte (2010)	X	X	X	X						X	<i>Branch-and-cut</i>	Furacão
Metz e Zabinsky (2010)	X	X	X		X					X	<i>Branch-and-cut</i>	Terremoto
Bozorgi-Amiri et al. (2011)	X		X		X					X	Otimização por enxame de partículas	-
Duran, Gutierrez e Keskinocak (2011)	X		X		X					X	<i>Branch-and-cut</i>	-
Li, Jin e Zhang (2011)	X		X	X	X					X	Algoritmo <i>L-shaped</i>	Furacão
Döyen, Aras e Barbarosglu (2011)	X		X		X					X	Heurística Lagrangiana (LH)	-
Rawls e Turnquist (2012)	X		X		X					X	<i>Branch-and-cut</i>	Furacão
Lodree, Ballard e Song (2012)			X		X					X	Heurística	Furacão
Noyan (2012)	X		X		X					X	<i>Branch-and-cut</i>	Furacão
Junior, Leiras e Yoshizaki (2013)	X		X		X					X	<i>Branch-and-cut</i>	-
Davis et al. (2013)	X		X		X					X	-	Furacão
Bozorgi-Amiri, Jabalameli e AL-E-HASHEM (2013)	X		X		X					X	<i>Branch-and-cut</i>	Terremoto
Kelle, Schneider e Yi (2014)			X	X	X					X	Algoritmo <i>L-shaped</i>	Furacão
Bataglin e Alem (2014)	X	X	X		X					X	<i>Branch-and-cut</i>	Inundação; movimentos de massa
Ahmadi, Seifi e Tootooni (2015)	X	X	X								<i>Branch-and-cut</i> ; algoritmo VNS (<i>neighborhood search algorithm</i>)	Terremoto
Rath, Gendreau e Gutjahr (2015)	X	X	X							X	<i>Branch-and-cut</i> ; heurística	-
Sumário	17	6	20	3	17	5						Terremoto (5); furacão (8); inundação (2)
Modelo FRFSMP proposto	X	X	X		X	X				X	<i>Branch-and-cut</i> ; heurística <i>relax-and-fix</i> ; heurística <i>fix-and-optimize</i> ; outra heurística	Inundação; movimentos de massa
Modelo FRFSDC proposto	X	X	X		X	X				X	<i>Branch-and-cut</i> ; heurística <i>relax-and-fix</i> ; heurística <i>fix-and-optimize</i> ; outra heurística	Inundação; movimentos de massa

¹ Proteção da rede de transporte, expansão da capacidade dos recursos disponíveis.

² Foi assumido que os autores que utilizaram o *solver* CPLEX utilizaram por *default* o método *branch-and-cut*, a não ser que especificarem o método utilizado.

³ Pré-posicionamento.

Tabela 2.5: Variáveis aleatórias e decisões de primeiro e segundo estágio nos modelos de programação estocástica.

Referência	Variáveis aleatórias	Primeiro estágio	Segundo estágio	Fonte para geração de cenários
Barbarosoglu e Arda (2004)	Demanda; suprimentos; capacidade dos veículos	Distribuição de suprimentos pré-desastre; definição de níveis de estoque	Transporte de suprimentos; dimensionamento da frota	Estudo das falhas de uma placa tectônica; dados históricos
Chang, Tseng e Chen (2007)	Demanda de equipamentos de resgate	Definição de níveis de estoque; localização	Distribuição de suprimentos; definição de níveis de estoque	Mapas de inundações potenciais no sistema de informação geográfica (GIS)
Fan e Liu (2008)	Demanda; disponibilidade dos arcos; tempo de transporte	Determinar quais rotas proteger antes do desastre	Distribuição e desenho de redes de trânsito	Amostragem de Monte Carlo
Balcik e Beamon (2008)	Demanda	Localizar centros de distribuição; definir níveis de estoque	Atendimento da demanda	Dados históricos
Rawls e Turnquist (2010)	Demanda; Proporção de estoque utilizável; disponibilidade dos arcos	Localização; definição de níveis de estoque	Distribuição de suprimentos	Dados históricos
Salmeron e Apte (2010)	Demanda; pessoal de resgate necessário; tempo de transporte; taxa de sobrevivência	Expansão dos recursos disponíveis (depósitos, equipe de socorro,...)	Distribuição de suprimentos; evacuação e resgate de afetados; dimensionamento da frota	Dados históricos
Metz e Zabinsky (2010)	Demanda; tempo de transporte	Localização; definição de níveis de estoques	Distribuição de suprimentos médicos; dimensionamento da frota	Estudo das falhas de uma placa tectônica; dados históricos
Bozorgi-Amiri et al. (2011)	Demanda; Proporção de estoque utilizável; custos	Localizar centros de distribuição; definição de níveis de estoque	Distribuição de suprimentos	Gerados aleatoriamente
Duran, Gutierrez e Keskinocak (2011)	Demanda	Localizar armazéns; definição de níveis de estoques	Distribuição de suprimentos	Dados históricos
Li, Jin e Zhang (2011)	Demanda; custos	Localização; definição de níveis de estoque	Transporte e alocação de evacuados aos centros de auxílio; distribuição de suprimentos	Estudo da localização e intensidade do histórico de furacões
Döyen, Aras e Barbarosoglu (2011)	Demanda; custos; capacidade dos centros de auxílio; tempo de transporte	Localização; definição de níveis de estoque	Operação de centros de auxílio; distribuição de suprimentos; alocação da demanda	Gerados aleatoriamente
Rawls e Turnquist (2012)	Demanda; disponibilidade dos arcos	Localização; definição de níveis de estoque	Distribuição de suprimentos	Dados históricos
Lodree, Ballard e Song (2012)	Demanda	Determinar a quantidade de suprimentos transportados e posicionados na rede	Redistribuição de estoque na rede	Gerados aleatoriamente
Noyan (2012)	Custos; demanda; proporção de estoque utilizável; disponibilidade dos arcos	Localização; definição de níveis de estoque	Distribuição de suprimentos	Dados de Rawls e Turnquist (2010)
Junior, Leiras e Yoshizaki (2013)	Custos; suprimentos; demanda; disponibilidade dos arcos; limite contratual de compras; demanda mínima para ser atendida; acessibilidade dos centros de auxílio	Localização; definição de níveis de estoque	Distribuição de suprimentos; alocação de purchase	Três categorias para a magnitude dos desastres (médios, grandes, catástrofes) e três categorias para influência da mídia (baixa, média, alta)
Davis et al. (2013)	Fração da demanda que deve ser satisfeita; Fator de congestionamento; Fator de mudança da demanda e dos suprimentos	Localizar centro de distribuição; transporte de suprimentos; definição de níveis de estoque	Distribuição de suprimentos	Previsões de furacões do centro nacional de furacões nos Estados Unidos
Bozorgi-Amiri, Jabalameli e AL-E-HASHEM (2013)	Custos; demanda; proporção de estoque utilizável	Localização; definição de níveis de estoque	Distribuição de suprimentos; definição de níveis de estoque	Estudo das falhas de uma placa tectônica; dados históricos
Kelle, Schneider e Yi (2014)	Demanda; custos	Definir níveis de estoque	Distribuição de suprimentos e transporte de evacuados	Dados de Li, Jin e Zhang (2011)
Bataglin e Alem (2014)	Demanda; disponibilidade dos arcos; proporção de estoque utilizável	Dimensionamento da frota; localização; atendimento da demanda	Transporte; definição de níveis de estoque	Três categorias para a magnitude dos desastres (pessimista, moderada, otimista)
Almadi, Seifi e Tootooni (2015)	Disponibilidade dos arcos; tempo de transporte	Localização; distribuição de suprimentos; dimensionamento da frota;	Tempo excedendo o limite de entrega estabelecido	Dados históricos
Rath, Gendreau e Gutjahr (2015)	Tempo de transporte; custos	Localização; dimensionamento da frota; definição do nível de orçamento operativo	Distribuição de suprimentos	Simulação de Monte Carlo; dados históricos
Sumário	Demanda (20); disponibilidade dos arcos (7); proporção de estoque utilizável (5); suprimentos (3); tempo de transporte (5); custos (8); outras (4)			
Modelo FRFSMP proposto	Demanda; proporção de estoque utilizável; disponibilidade dos arcos; suprimentos	Localização; dimensionamento da frota	Distribuição de suprimentos; definição de níveis de estoque; atendimento da demanda; dimensionamento da frota	Dados históricos
Modelo FRFSDC proposto	Demanda; proporção de estoque utilizável; disponibilidade dos arcos; suprimentos	Localização; dimensionamento da frota	Distribuição de suprimentos; definição de níveis de estoque; atendimento da demanda; dimensionamento da frota	Dados históricos

Capítulo 3

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Conforme discutido no capítulo anterior, na literatura há ausência de modelos de programação estocástica que integrem as operações de localização, distribuição e dimensionamento da frota para contextos multi-período, multi-produto e com frota heterogênea. Nesse trabalho, o problema de localização e distribuição de suprimentos em operações de resposta a desastres combina quatro sub-problemas: localização de centros de auxílio, dimensionamento da frota, transporte de produtos e alocação da demanda aos centros de auxílio. Os dois primeiros subproblemas estão associados à decisões de preparação, enquanto os dois últimos, à decisões de resposta.

O problema de localização de centros de auxílio determina em qual das possíveis localidades operar os centros de auxílio, considerando que a demanda deve ser atendida pelos centros de auxílio abertos, os quais têm uma capacidade (limitação física no volume) de armazenamento total e por produto que deve ser respeitada. A capacidade por produto dos centros de auxílio indica que nem todos os centros de auxílio têm capacidade para armazenar todos os tipos de produtos, e.g., é possível que algum centro de auxílio não tenha refrigeração para manter alguns produtos médicos com a qualidade necessária. Nesse caso, tais produtos não poderão ser enviados para esse centro de auxílio. A localização dos depósitos é conhecida, e assume-se que não estão limitados pela sua capacidade, mas sim pela disponibilidade dos suprimentos. Podem existir estoques de produtos nos depósitos e nos centros de auxílio, sendo que nem toda a quantidade de produtos estocados nos centros de auxílio permanece em condições de ser utilizada de um período para o outro devido ao impacto do desastre.

O dimensionamento da frota envolve a decisão de determinar a quantidade e os tipos de veículos que devem ser contratados em cada depósito para distribuir os produtos aos centros de auxílio. Veículos podem ser contratados e designados para os depósitos em ambas as fases de preparação e resposta. Os veículos contratados na fase de preparação são mantidos durante todo o horizonte de tempo das operações humanitárias, independente do impacto real do desastre, e

podem, ou não, serem de fato utilizados. Geralmente as negociações dos contratos dos veículos na fase pré-desastre são realizadas através de licitações, por exemplo, portanto quase sempre são alcançados preços relativamente menores em relação aos do mercado. Por outro lado, na fase de resposta, os veículos são contratados por períodos menores e de acordo com o impacto dos desastres. A contratação desses veículos na fase de resposta é realizada através de contratos contingenciais e de início imediato (no mercado *spot*) enquanto os custos de contratação são maiores do que os custos de contratação dos veículos na fase de preparação.

O transporte de produtos, por sua vez, consiste em determinar a quantidade de cada tipo de produto que deve ser enviada aos centros de auxílio, que armazenam temporariamente os produtos demandados pelas áreas afetadas. Além disso, deve-se determinar em que tipo de veículos deve ser realizado o transporte desses produtos, uma vez que existe um conjunto de rotas que, como resultado do impacto do desastre, não estão disponíveis para alguns tipos de veículos. A quantidade de produtos que podem ser transportados está limitada pela capacidade dos centros de auxílio (em volume) e pela capacidade dos veículos (em volume e peso). Na prática, como há produtos com características distintas, é importante que os meios de transporte considerem essas duas dimensões. A rota dos veículos consiste em partir de um depósito até um centro de auxílio e retornar ao depósito para realizar novos transportes. Os veículos podem ser reutilizados para realizar várias viagens entre depósitos e centros de auxílio e podem começar o transporte num período e retornar ao depósito em períodos posteriores. Note que o problema de transporte está intimamente relacionado ao dimensionamento de frota.

O problema de alocação da demanda consiste em designar uma fração da demanda de cada área afetada aos centros de auxílio onde as vítimas podem se abastecer com os itens que necessitam. Assume-se um custo pelo atendimento da demanda que é proporcional à distância entre os centros de auxílio e as áreas afetadas. Tal custo é nulo se um centro de auxílio atende à demanda da mesma área onde está localizado. Este custo evita o atendimento de demanda de áreas afetadas por centros de auxílio afastados sempre que existam centros de auxílio mais próximos que possam atender tal demanda.

A Figura 3.1 apresenta a rede do problema de localização-distribuição com decisões de dimensionamento da frota proposto nesse trabalho. As setas entre os depósitos e os centros de auxílio representam o fluxo dos produtos pelos diferentes tipos de veículos nos arcos $i \rightarrow j$. As setas entre as áreas afetadas e os centros de auxílio representam a alocação da demanda que deve ser atendida em cada centro de auxílio.

Dado que não é possível conhecer com antecedência as consequências precisas dos desastres, foram assumidas as seguintes variáveis aleatórias: o suprimento nos depósitos, que é resultado de

doações ou apoio econômico do governo; a proporção de estoque utilizável nos centros de auxílio, que é relativa às condições dos produtos transportados e às condições de armazenamento e ao impacto do desastre; a demanda nas áreas afetadas, que depende do impacto do desastre sobre a população; e a disponibilidade das rotas, que depende das consequências do desastre sobre a rede de transporte. As variáveis aleatórias são aproximadas por um conjunto discreto de realizações ou cenários, representados por Ξ , com probabilidades de ocorrência $\pi(\xi)$ que designam a chance de tal cenário materializar-se. O objetivo do modelo é realizar o atendimento das vítimas do desastre minimizando o custo total esperado. A Figura 3.2 representa as variáveis aleatórias envolvidas no problema, e as decisões de primeiro e segundo estágio.

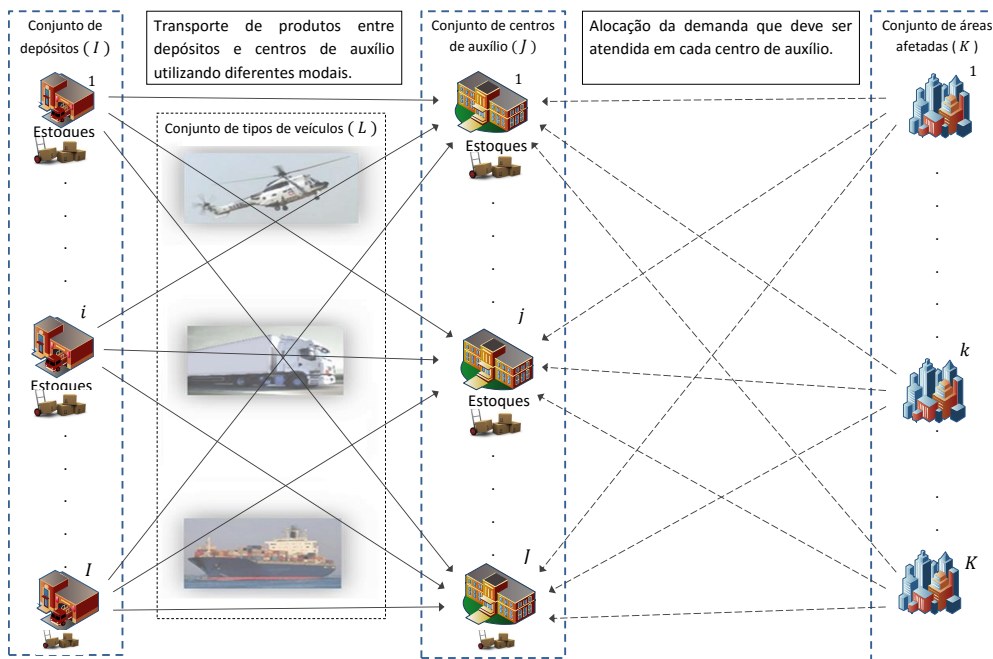


Figura 3.1: Rede no problema de localização-distribuição de produtos.

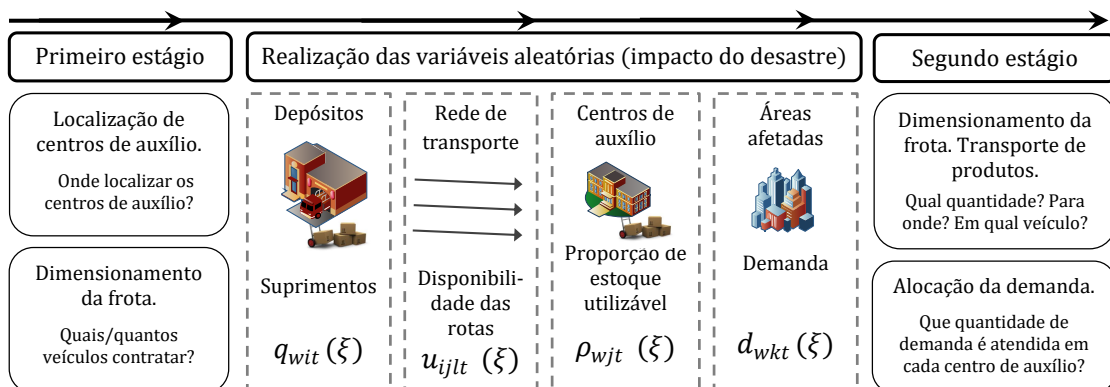


Figura 3.2: Decisões e parâmetros estocásticos no problema de distribuição-localização.

3.1 Modelo FRFSMP

O modelo matemático FRFSMP (*Facility routing with fleet sizing decisions and micro-time periods under uncertainty*) foi desenvolvido com base nas formulações matemáticas FRFS e FRFST apresentadas no Apêndice A. Diferencia-se daqueles modelos por considerar que os veículos podem ser utilizados/reutilizados dentro de um mesmo período e também na transição de um período para o outro, i.e., os veículos podem sair dos depósitos num período e retornar a ele em períodos posteriores. Para isso, foi utilizada uma formulação com subperíodos dentro de cada um dos períodos do horizonte de planejamento das operações humanitárias. As decisões de localização, contratação, estoque, atraso e atendimento da demanda são consideradas para cada período enquanto que, as decisões de transporte são consideradas por subperíodo. O modelo FRFSMP se diferencia do modelo FRFST na forma em os veículos são reutilizados ao longo do horizonte de planejamento. No modelo FRFST os veículos podem ser reutilizados dentro de um mesmo período de tempo, enquanto que no modelo FRFSMP os veículos podem ser reutilizados ao longo do horizonte completo, incluso quando a saída e o retorno ao depósito são em períodos diferentes. As setas vermelhas na Figura 3.3 ilustram os subperíodos de utilização de um veículo no modelo FRFSMP.

Para a definição do modelo FRFSMP considere os seguintes conjuntos, parâmetros e variáveis.

Conjuntos

\mathcal{W}	Produtos requeridos pela população afetada.
\mathcal{I}	Depósitos de onde partem as ajudas humanitárias.
\mathcal{J}	Centros de auxílio que recebem a ajuda humanitária.
\mathcal{K}	Áreas afetadas representadas por cidades ou regiões.
\mathcal{L}	Tipos de veículos que podem ser contratados.
\mathcal{T}	Períodos de tempo do horizonte associado às operações humanitárias.
Ξ	Possíveis cenários de ocorrência das variáveis aleatórias.
Γ	Conjunto dos subperíodos do horizonte de tempo.
$\Gamma(t) \subseteq \Gamma$	Conjunto dos subperíodos do período $t \in \mathcal{T}$.
$F \subseteq \Gamma$	Refere-se ao subconjunto de Γ composto pelo primeiro subperíodo de cada período. Para um horizonte de 4 dias e subperíodos de tamanho de 4 horas, $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4\} = \{1, 7, 13, 19\}$.
$F' \subseteq \Gamma$	Refere-se ao subconjunto de Γ composto pelo último subperíodo de cada período. Para um horizonte de 4 dias e subperíodos de 4 horas, $F' = \{f'_1, f'_2, f'_3, f'_4\} = \{6, 12, 18, 24\}$.

A Figura 3.3 ilustra um exemplo da relação dos períodos e subperíodos.

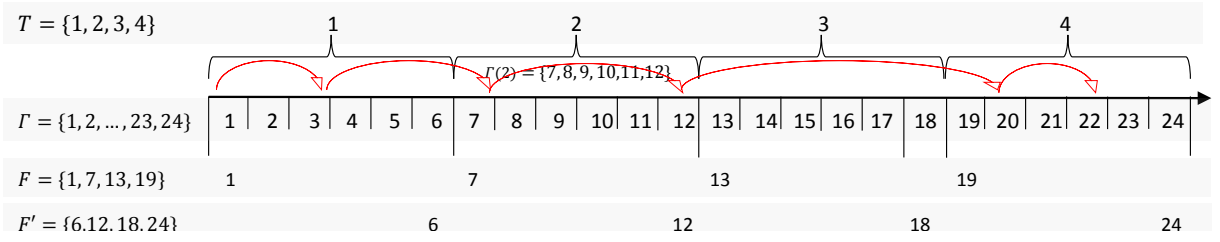


Figura 3.3: Exemplo de um horizonte de planejamento de 4 dias, cada dia (período) com 6 subperíodos de tamanho 4 horas cada um.

Parâmetros Determinísticos

- α_j^{oper} Custo fixo de abertura e operação do centro de auxílio j
(infra-estrutura básica requerida, energia elétrica, água, equipe humanitária).
- $\beta_l(\beta'_l)$ Custo fixo por veículo tipo l no primeiro (segundo) estágio
(compra, contratação ou manutenção).
- γ_{ijl} Custo de transporte do veículo l na rota $i \rightarrow j$.
- ϕ_w^+ Custo de estoque do produto w .
- ϕ_w^- Penalidade por demanda insatisfeita do produto w .
- δ_{kj} Custo do centro de auxílio j atender a demanda da área afetada k .
- $b_w(b'_w)$ Volume (peso) do produto w .
- $k_l^v(k'^v_l)$ Capacidade em volume (peso) do veículo l .
- k_j^c Capacidade total do centro de auxílio j (volume).
- k_{wj}^{cp} Capacidade de armazenamento do produto w no centro de auxílio j ,
(quantidade de produtos).
- k_{ijl}^{arc} Número máximo de veículos l que podem atravessar a rota $i \rightarrow j$.
- k_l^n Número máximo de veículos l disponíveis no primeiro estágio
para as operações humanitárias.
- ℓ_{ijl} Tempo de transporte do veículo l na rota $i \rightarrow j$. Por simplicidade, assume-se
que o tempo de transporte nos arcos $i \rightarrow j$ e $j \rightarrow i$ é igual, i.e., é simétrico.

Parâmetros estocásticos

- $q_{wit}(\xi)$ Quantidade do produto w disponível no depósito i no período t e cenário ξ .
- $\rho_{wjt}(\xi)$ Proporção do produto w no centro de auxílio j no cenário ξ que permanece utilizável entre dois períodos $t - 1$ e t .
- $d_{wkt}(\xi)$ Demanda do produto w na área afetada k no período t no cenário ξ .
- $u_{ijlt}(\xi) = 1$, se a rota $i \rightarrow j$ está disponível para o veículo l no período t no cenário ξ
 $= 0$, caso contrário.
- $\pi(\xi)$ Probabilidade de ocorrência do cenário ξ .

Variáveis de decisão de primeiro estágio

- N_{il} Número de veículos l contratados pelo depósito i no primeiro estágio.
- $Y_j^{oper} = 1$, se o centro de auxílio j é aberto para as operações humanitárias
 $= 0$, caso contrário.

Variáveis de decisão de segundo estágio

- $N'_{ilt}(\xi)$ Número de veículos l contratados pelo depósito i no período t no cenário ξ no segundo estágio.
- $P_{wijl\tau}(\xi)$ Quantidade de produtos w transportados no arco $i \rightarrow j$ pelo veículo l com início no subperíodo τ no cenário ξ .
- $V_{ijl\tau}(\xi)$ Número de veículos tipo l que iniciam o transporte de produtos no arco $i \rightarrow j$ no subperíodo τ no cenário ξ .
- $Z_{wjk}(\xi)$ Número de produtos w entregues ao centro de auxílio j para satisfazer demanda da área afetada k no período t no cenário ξ .
- $I_{wit}^d(\xi)$ Estoque do produto w no depósito i no período t no cenário ξ .
- $I_{wjt}^{rc}(\xi)$ Estoque do produto w no centro de auxílio j no período t no cenário ξ .
- $U_{wkt}(\xi)$ Demanda insatisfeita do produto w na área afetada k no período t no cenário ξ .

Seja Λ o conjunto de todas as variáveis de decisão. O modelo de programação estocástica inteira-mista de dois estágios para o problema de localização-distribuição de suprimentos com decisões de dimensionamento é formulado como mostrado a seguir.

Função objetivo

A função objetivo (3.1) minimiza o custo total esperado, composto pelos custos de primeiro estágio (operação dos centros de auxílio e contratação de veículos) e pelos custos de segundo estágio (contratação de veículos, transporte, estoque, atraso e atendimento da demanda).

$$\min_{\Lambda} \quad YC^{oper} + NC + NC' + VC + ZC + IC + UC \quad (3.1)$$

em que

$YC^{oper} = \sum_{j \in \mathcal{J}} \alpha_j^{oper} \cdot Y_j^{oper}$ é o custo total de abertura e operação dos centros de auxílio;

$NC = \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \beta_l \cdot N_{il}$ é o custo total pela designação (contratação) dos veículos no primeiro

estágio;

$NC' = \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \beta'_l \cdot N'_{ilt}(\xi)$ é o custo total pela designação (contratação) dos veículos

no segundo estágio;

$VC = \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \gamma_{ijl} \cdot V_{ijl\tau}(\xi)$ é o custo total de transporte;

$ZC = \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \delta_{kj} \cdot Z_{wkjt}(\xi)$ é o custo total de atendimento da demanda das

área afetadas;

$IC = \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \phi_w^+ \cdot I_{wjt}^{rc}(\xi)$ é o custo total de estoque nos centros de auxílio;

$UC = \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \phi_w^- \cdot U_{wkt}(\xi)$ é a penalidade total por demanda insatisfeita.

Restrições

Conservação do fluxo – As restrições (3.2), (3.3) e (3.4) garantem a conservação do fluxo de produtos nos centros de auxílio, nas áreas afetadas e nos depósitos, respectivamente. Note que os produtos estão disponíveis nos centros de auxílio ℓ_{ijl} subperíodos após a saída dos depósitos. Assim, os produtos que chegam nos centros de auxílio no subperíodo τ são os que saíram do depósito no subperíodo $\tau - \ell_{ijl}$ (lembrando que ℓ_{ijl} é o tempo de transporte do veículo l no arco $i \rightarrow j$). Se $\ell_{ijl} = 2$, por exemplo, um produto w transportado num veículo tipo l que inicia o transporte no arco $i \rightarrow j$ no subperíodo $\tau = 5$, permanece no arco $i \rightarrow j$ nos subperíodos 5-6, e está disponível a partir do subperíodo 7 no centro de auxílio j . Portanto, saídas no subperíodo $\tau - \ell_{ijl}$ dos depósitos implicam chegadas no subperíodo τ nos centros de auxílio. Na restrição (3.2), o estoque que pode ser utilizado de um período para o seguinte é reduzido pela proporção de estoque utilizável $\rho_{wjt}(\xi)$. A restrição (3.3) determina a demanda insatisfeita (atraso) das áreas afetadas. Note que a demanda insatisfeita de cada período é acumulada até o final das operações humanitárias ou até ser atendida. Sem perda de generalidade, assume-se que os estoques e atraso iniciais são nulos, i.e., $U_{wj0}(\xi) = I_{wj0}^{rc}(\xi) = I_{wi0}^d(\xi) = 0$.

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} P_{wijl(\tau - \ell_{ijl})}(\xi) + \rho_{wjt}(\xi) \cdot I_{wj(t-1)}^{rc}(\xi) = \sum_{k \in \mathcal{K}} Z_{wkjt}(\xi) + I_{wjt}^{rc}(\xi), \quad \forall w \in \mathcal{W}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.2)$$

$$U_{wkt}(\xi) = d_{wkt}(\xi) - \sum_{j \in \mathcal{J}} Z_{wkjt}(\xi) + U_{wk(t-1)}(\xi), \quad \forall w \in \mathcal{W}, k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.3)$$

$$q_{wit}(\xi) + I_{wi(t-1)}^d(\xi) = \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} P_{wijl\tau}(\xi) + I_{wit}^d(\xi), \quad \forall w \in \mathcal{W}, i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.4)$$

Restrições de capacidade dos centros de auxílio – As restrições (3.5) e (3.6) garantem que

só pode existir transporte para um centro de auxílio se ele estiver em operação ($Y_j^{oper} = 1$). Por outro lado, limitam o fluxo de produtos nos centros de auxílio de acordo com a sua capacidade total e por produto, respectivamente. A capacidade consumida pelos produtos transportados para um centro de auxílio mais a capacidade consumida pelos produtos que já estão no centro de auxílio deve ser menor ou igual à capacidade total do centro de auxílio.

$$\sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} b_w \cdot P_{wijkl(\tau - \ell_{ijl})}(\xi) + \sum_{w \in \mathcal{W}} b_w \cdot I_{wj(t-1)}^{rc}(\xi) \leq k_j^c \cdot Y_j^{oper},$$

$$\forall j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} P_{wijkl(\tau - \ell_{ijl})}(\xi) + I_{wj(t-1)}^{rc}(\xi) \leq k_{wj}^{cp} \cdot Y_j^{oper}, \forall w \in \mathcal{W}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.6)$$

Número mínimo de veículos no segundo estágio – As restrições (3.7) e (3.8) determinam o número mínimo de veículos necessários para realizar o transporte de produtos dos depósitos aos centros de auxílio no segundo estágio, respeitando as capacidades (peso e volume) dos veículos.

$$V_{ijl\tau}(\xi) \geq \frac{\sum_{w \in \mathcal{W}} b_w \cdot P_{wijkl\tau}(\xi)}{k_l^v}, \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \tau \in \Gamma, \xi \in \Xi. \quad (3.7)$$

$$V_{ijl\tau}(\xi) \geq \frac{\sum_{w \in \mathcal{W}} b'_w \cdot P_{wijkl\tau}(\xi)}{k_l^{r_v}}, \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \tau \in \Gamma, \xi \in \Xi. \quad (3.8)$$

Contratação de veículos – A restrição (3.9) assegura que somente veículos contratados podem ser utilizados para o transporte de suprimentos. Um veículo tipo l demora $2\ell_{ijl}$ subperíodos para ir do depósito i até o centro de auxílio j e retornar. Se $\ell_{ijl} = 2$, por exemplo, um veículo tipo l que inicia o transporte no arco $i \rightarrow j$ no subperíodo $\tau = 5$, permanece ocupado nos subperíodos 5-6-7-8 ($2\ell_{ijl} = 4$ subperíodos), ou seja, até o subperíodo $\tau + (2\ell_{ijl} - 1) = 5 + 4 - 1 = 8$. Assim, um veículo tipo l é utilizado no subperíodo τ se saiu do depósito entre os subperíodos $\tau' = \tau - (2\ell_{ijl} - 1)$ e $\tau' = \tau$. A restrição (3.10) restringe o número de veículos de cada tipo que podem ser contratados no primeiro estágio. Não foi considerada uma restrição para a contratação de veículos no segundo estágio.

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{\tau' = \tau - (2\ell_{ijl} - 1)}^{\tau} V_{ijl\tau'}(\xi) \leq N_{il} + N'_{ilt}(\xi), \forall i \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{L}, \tau \in \Gamma(t), t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.9)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} N_{il} \leq k_l^n, \forall l \in \mathcal{L}. \quad (3.10)$$

Disponibilidade das rotas – A restrição (3.11) estabelece que um veículo tipo l não pode ser utilizado num arco $i \rightarrow j$ no subperíodo τ no cenário ξ se o arco estiver indisponível. Esta restrição também limita o número de veículos que podem ser utilizados à capacidade de transporte na rota (k_{ijl}^{arc}).

$$\sum_{\tau' = \tau - (2\ell_{ijl} - 1)}^{\tau} V_{ijl\tau'}(\xi) \leq k_{ijl}^{arc} \cdot u_{ijlt}(\xi), \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \tau \in \Gamma(t), t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.11)$$

Domínio das variáveis – As restrições (3.12)-(3.15) representam o domínio das variáveis de decisão.

$$\mathbf{Y}^{oper} \in \mathbb{B}^{|\mathcal{J}|}. \quad (3.12)$$

$$\mathbf{N} \in \mathbb{R}^+. \quad (3.13)$$

$$\mathbf{V}(\xi) \in \mathbb{Z}^+, \forall \xi \in \Xi. \quad (3.14)$$

$$\mathbf{N}'(\xi), \mathbf{P}(\xi), \mathbf{Z}(\xi), \mathbf{I}^{rc}(\xi), \mathbf{U}(\xi), \mathbf{I}^d(\xi) \in \mathbb{R}^+, \forall \xi \in \Xi. \quad (3.15)$$

É importante acrescentar que, para a maioria das situações reais, a capacidade dos arcos (k_{ijl}^{arc}) é grande e, portanto, do ponto de vista prático, não é uma limitação para a utilização de veículos. Porém, do ponto de vista teórico/computacional, esse parâmetro oferece um limitante superior para a variável discreta $V_{ijl\tau}(\xi)$. Por outro lado, se o número máximo de veículos (k_l^n) que podem ser contratados no primeiro estágio é muito grande, a restrição (3.10) é redundante e, pode ser eliminada ou utilizada para estabelecer limitantes para as variáveis N_{il} .

A Tabela 3.1 apresenta o número de restrições e variáveis do modelo FRFSMP.

Tabela 3.1: Número de restrições, variáveis contínuas, inteiras e binárias do modelo FRFSMP.

Número de restrições	$ \mathcal{W} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{W} \cdot \mathcal{I} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{W} \cdot \mathcal{K} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{J} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{W} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + 2 \cdot \mathcal{I} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{L} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{I} \cdot \mathcal{L} \cdot \Gamma \cdot \Xi + \mathcal{I} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{L} \cdot \Gamma \cdot \Xi + \mathcal{L} $
Número de variáveis contínuas	$ \mathcal{L} \cdot \mathcal{I} + \mathcal{J} + \mathcal{I} \cdot \mathcal{L} \cdot \Gamma \cdot \Xi + \mathcal{W} \cdot \mathcal{I} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{L} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{W} \cdot \mathcal{K} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{W} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{W} \cdot \mathcal{I} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{W} \cdot \mathcal{K} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi $
Número de variáveis binárias	$ \mathcal{J} $
Número de variáveis inteiras	$ \mathcal{I} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{L} \cdot \Gamma \cdot \Xi $

Uma apresentação resumida do modelo RFFSMP encontra-se no Apêndice B.

3.2 Modelo FRFSDC

Na formulação anterior (modelo FRFSMP) considerou-se que a demanda insatisfeita pode ser atendida em qualquer momento até o final do horizonte de tempo. Porém, existem situações em que, após uma certa quantidade de subperíodos sem atendimento, não faz mais sentido satisfazer essa demanda. Este é o caso de, por exemplo, pessoas que saem da área afetada a procura de produtos ou até morrem por falta de produtos indispensáveis após horas ou dias sem atendimento. Além disso, o modelo FRFSMP não leva em conta o tempo que a demanda tem permanecido insatisfeita, o que deveria ser determinante para priorizar as entregas, i.e., demanda que tem permanecido por mais tempo sem atendimento deveria ter prioridade para atendimentos futuros. Para isso, conforme discutido no Capítulo 1, nesse trabalho são considerados custos sociais definidos como a soma dos custos logísticos e os custos de privação.

Os custos de privação podem ser associados a um valor monetário que represente o dano causado às vítimas devido à ausência de algum produto durante um período de tempo, considerando que tal carência pode causar danos físicos irreversíveis, e em alguns casos, até mesmo a morte. Uma das dificuldades da consideração de custos de privação é determinar como os mesmos devem ser quantificados e medidos, pois usar uma medida de eficiência econômica como métrica para a distribuição de recursos em situações de desastre é controverso pelas implicações éticas e/ou morais que isso implica (HOLGUÍN-VERAS et al., 2013).

A principal contribuição do modelo FRFSDC (*Facility routing with fleet sizing decisions and deprivation costs under uncertainty*) é a incorporação de custos sociais na função objetivo, considerando o tempo que as vítimas nas áreas afetadas permanecem sem receber os suprimentos. Assume-se que a demanda nas áreas afetadas surge no final de cada período t , portanto, a demanda é considerada insatisfeita a partir do início do período seguinte, i.e., a partir do subperíodo $f_{(t+1)}$.

Para definir o modelo FRFSDC, são considerados os mesmos parâmetros e variáveis do modelo anterior e a seguinte notação adicional.

Conjuntos

$\Gamma' = \Gamma \cup \{|\Gamma| + 1\}$. O conjunto Γ' considera o conjunto de subperíodos Γ do horizonte de tempo e mais um subperíodo $\{|\Gamma| + 1\}$.

Δ_w Tempo de privação (em número de subperíodos) que a demanda do produto w pode permanecer insatisfeita, e.g., $\Delta_1 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ indica que a demanda do produto 1 pode permanecer insatisfeita de 1 a 6 subperíodos, após os quais não pode ser mais atendida. Note que estes números não estão relacionados aos subperíodos de 1 a 6, mas apenas à quantidade de subperíodos (1 subperíodo, ..., 6 subperíodos) de privação, não importando o momento no que a privação do produto ocorre no horizonte de planejamento. $|\Delta_w|$ é o tempo máximo de privação que uma pessoa pode permanecer sem receber o produto w . Tal valor é diferente para cada produto. Por exemplo, o tempo máximo de privação de água e remédios é muito menor do que o tempo máximo de privação de roupas e colchões. Este conjunto é indexado em δ .

Parâmetros

$g_w(\delta)$ Custo de privação do produto w em função do tempo de privação $\delta \in \Delta_w$.

Variáveis

$\bar{U}_{wkt\tau}(\xi)$ Demanda do produto w da área afetada k do período t insatisfeita até o subperíodo $\tau \in \Gamma'$ no cenário ξ .

$U'_{w\delta}(\xi)$ Demanda total do produto w que permanece insatisfeita por um tempo de privação $\delta \in \Delta_w$ no cenário ξ .

$Z'_{wkJt\tau}(\xi)$ Número de produtos w entregues ao centro de auxílio j no subperíodo $\tau \in \Gamma$ para satisfazer a demanda do período t da área afetada k no cenário ξ .

Seja Λ o conjunto de todas as variáveis de decisão. O modelo de programação estocástica inteira-mista de dois estágios para o problema de localização-distribuição de suprimentos com decisões de dimensionamento e custos de privação é formulado como mostrado a seguir.

Função objetivo

A função objetivo (3.16) se diferencia da função objetivo (3.1) no cálculo do custo total de privação ($DC + DC'$) e no cálculo do custo por atendimento da demanda (ZC').

$$\min_{\Lambda} \quad YC^{oper} + NC + NC' + VC + ZC' + IC + DC + DC' \quad (3.16)$$

em que

$DC = \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{\delta \in \Delta_w} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot (g_w(\delta) - g_w(\delta - 1)) \cdot U'_{w\delta}(\xi)$ é o custo total de privação pelo atraso de produtos dentro do horizonte de planejamento;

$DC' = \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \max\{g_w(|\Delta_w|) - g_w(|\Gamma| - f'_t), 0\} \cdot \bar{U}_{wkt|\Gamma'|}$ é o custo total de privação por demanda insatisfeita no final do horizonte de planejamento;

$ZC' = \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\tau \in \Gamma} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \delta_{kj} \cdot Z'_{wkJt\tau}(\xi)$ é o custo total de atendimento da demanda das área afetadas.

Nesse modelo, considera-se que uma demanda que permanece insatisfeita por δ subperíodos, também permaneceu insatisfeita por $\delta - 1, \delta - 2, \dots, 1$ subperíodos. Portanto, na função objetivo (3.16) não é utilizado o custo acumulado $g_w(\delta)$, mas $g_w(\delta) - g_w(\delta - 1)$. Assim, a demanda que permanece insatisfeita por $\delta = 3$ subperíodos, por exemplo, é penalizada com $(g_w(3) - g_w(2)) + (g_w(2) - g_w(1)) + (g_w(1) - g_w(0)) = g_w(3)$ com $g_w(0) = 0$. Considera-se também que a demanda do produto w que fica insatisfeita no final do horizonte de planejamento ($\bar{U}_{wkt\tau}(\xi) : \tau = |\Gamma'|$) nunca vai ser atendida, e portanto deve ser penalizada com o máximo custo de privação $g_w(|\Delta_w|)$. Para isso é utilizada uma parcela adicional na função objetivo que penaliza $\bar{U}_{wkt|\Gamma'}(\xi)$ com $\max\{g_w(|\Delta_w|) - g_w(|\Gamma| - f'_t), 0\}$ no último subperíodo do horizonte de tempo (Γ'). Por exemplo, suponha uma quantidade de demanda do produto w (com $|\Delta_w| = 72$) do período 3 que não é atendida no horizonte de planejamento de $|\mathcal{T}| = 4$ períodos (dias) e $|\Gamma| = 96$ subperíodos (horas). A demanda insatisfeita do produto w do período 3 é penalizada a partir do subperíodo $\tau = 73$ (primeiro subperíodo do período 4) com um custo $g_w(1)$, e continua sendo penalizada até o subperíodo $\tau = 96$ com um custo total $g_w(24)$. Como não foi atendida dentro do horizonte de tempo deveria ser penalizada com $g_w(72)$. Portanto, deve ser acrescentado um custo $\max\{g_w(|\Delta_w|) - g_w(|\Gamma| - f'_t), 0\} = \max\{g_w(72) - g_w(96 - 72), 0\} = g_w(72) - g_w(24)$. Por outro lado, se $|\Delta_w| = 20$, então a demanda não atendida do produto w do período 3 alcança o máximo custo de privação $g_w(20)$ no subperíodo $\tau = 92$ e portanto não devem ser acrescentados custos no final do horizonte de planejamento, i.e., $\max\{g_w(20) - g_w(24), 0\} = 0$, pois $g_w(\delta) \geq g_w(\delta'), \forall \delta \geq \delta'$.

Restrições

As restrições (3.4)-(3.14) são as mesmos do modelo FRFSMP. As demais restrições foram modificadas conforme segue.

Conservação do fluxo – Similar à restrição (3.2), a restrição (3.17) garante a conservação do fluxo de produtos nos centros de auxílio. Note que nos subperíodos de um período t ($\tau \in \Gamma(t)$) pode existir atendimento de parte da demanda insatisfeita de períodos anteriores (de $t' = 1$ até $t' = t - 1$) ou da demanda do período atual ($t' = t$).

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} P_{wijl(\tau - \ell_{ijl})}(\xi) + \rho_{wjt}(\xi) \cdot I_{wj(t-1)}^{rc}(\xi) = \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} \sum_{t'=1}^t Z'_{wkJt'\tau}(\xi) + I_{wj}^{rc}(\xi),$$

$$\forall w \in \mathcal{W}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.17)$$

Calculo da demanda insatisfeita – Similar à restrição (3.3), as restrições (3.18) e (3.19)

determinam a demanda insatisfeita. A restrição (3.18) calcula a demanda insatisfeita do período t no primeiro subperíodo do período $t + 1$ ($\tau = f_{(t+1)}$). A restrição (3.19) faz o cálculo da demanda que continua insatisfeita para os demais subperíodos ($\tau \geq f_{(t+1)} + 1$). Note que a demanda insatisfeita do período t é contabilizada a partir do primeiro subperíodo do período $t + 1$, e pode permanecer insatisfeita até, no máximo, $|\Delta_w|$ subperíodos (tempo máximo de privação), tempo após o qual a demanda é considerada perdida, i.e., $\tau \in \Gamma' : f_{(t+1)} \leq \tau \leq f'_t + |\Delta_w|$. A demanda insatisfeita do ultimo período é calculada no subperíodo $|\Gamma'| = |\Gamma| + 1$.

$$\bar{U}_{wkt(f_{(t+1)})}(\xi) = d_{wkt}(\xi) - \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} Z'_{wkJt\tau}(\xi), \quad \forall w \in \mathcal{W}, k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.18)$$

$$\bar{U}_{wkt\tau}(\xi) = \bar{U}_{wkt(\tau-1)}(\xi) - \sum_{j \in \mathcal{J}} Z'_{wkJt\tau}(\xi),$$

$$\forall w \in \mathcal{W}, k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, \tau \in \Gamma' : f_{(t+1)} + 1 \leq \tau \leq f'_t + |\Delta_w|, \xi \in \Xi. \quad (3.19)$$

Cálculo da demanda insatisfeita por tempo de privação – A restrição (3.20) calcula a demanda total do produto w que permaneceu insatisfeita durante δ subperíodos no cenário ξ . Uma quantidade de demanda do produto w do período t permanece insatisfeita por δ subperíodos se não for atendida nos δ subperíodos após o último subperíodo do período t , i.e., se não for satisfeita até o subperíodo $f'_t + \delta$. Por exemplo, num horizonte de planejamento de 3 dias e 72 subperíodos (24 por cada dia), a demanda insatisfeita dos períodos 1 e 2 permanece insatisfeita por $\delta = 3$ subperíodos de privação se não for atendida até os subperíodos $f'_1 + 3 = 24 + 3 = 27$ e $f'_2 + 3 = 48 + 3 = 51$, respectivamente. Nesta restrição não é considerada a demanda que fica sem atendimento ao final do horizonte de planejamento ($\bar{U}_{wkt|\Gamma'|}(\xi)$), pois esta é penalizada numa parcela diferente da função objetivo, portanto, $f'_t + \delta \neq |\Gamma'|$.

$$U'_{w\delta}(\xi) = \sum_{\substack{t \in \mathcal{T}: \\ f'_t + \delta \neq |\Gamma'|}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \bar{U}_{wkt(f'_t + \delta)}(\xi), \quad \forall w \in \mathcal{W}, \delta \in \Delta_w, \xi \in \Xi. \quad (3.20)$$

Restrição de entrega de produtos por subperíodo – A restrição (3.21) evita que num subperíodo possam ser entregues mais produtos do que a quantidade disponível em cada centro de auxílio. Os produtos podem ser entregues para satisfazer a demanda insatisfeita de períodos anteriores ($t' = 1$ até $t' = t - 1$) ou a demanda do período atual ($t' = t$).

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{\tau' = f_t}^{\tau} \sum_{t' = 1}^t Z'_{wkJt'\tau'}(\xi) \leq \rho_{wj}(\xi) \cdot I_{wj(t-1)}^{rc}(\xi) + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau' = f_t}^{\tau} P_{wijl(\tau' - l_{ij})}(\xi),$$

$$\forall w \in \mathcal{W}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}, \tau \in \Gamma(t), \xi \in \Xi. \quad (3.21)$$

Domínio das variáveis - A restrição (3.22) representa as mudanças no domínio das variáveis de decisão.

$$\mathbf{N}'(\xi), \mathbf{P}(\xi), \mathbf{Z}'(\xi), \mathbf{I}^{rc}(\xi), \bar{\mathbf{U}}(\xi), \mathbf{U}'(\xi), \mathbf{I}^d(\xi) \in \mathbb{R}^+, \forall \xi \in \Xi. \quad (3.22)$$

Na implementação computacional dos modelos não é necessário criar algumas variáveis e restrições, o que pode reduzir o tamanho do modelo gerado no *software* e permite carregar algumas instâncias que não era possível carregar considerando o modelo completo. As variáveis $P_{wijkl\tau}(\xi)$ e $V_{ijkl\tau}(\xi)$, por exemplo, não são criadas para o conjunto de arcos $i \rightarrow j$ que não estão disponíveis. A variável $\bar{U}_{wkt\tau}(\xi)$ é criada unicamente para os subperíodos nos quais pode existir privação do produto w , i.e., $\forall \tau \in \Gamma' : f_{(t+1)} \leq \tau \leq f'_t + |\Delta_w|$. De forma similar, a variável $Z'_{wkt\tau}(\xi)$ é criada unicamente para atender demanda de períodos passados ou do período atual, i.e., $\forall \tau \in \Gamma' : f_t \leq \tau \leq f'_t + |\Delta_w|$. Essas modificações não afetam a solução ótima dos modelos.

A Tabela 3.2 apresenta o número de restrições e variáveis do modelo FRFSDC.

Tabela 3.2: Número de restrições, variáveis contínuas, inteiras e binárias do modelo FRFSDC.

Número de restrições	$ \mathcal{W} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{W} \cdot \mathcal{I} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{K} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi \cdot \sum_w \Delta_w + \Xi \cdot \sum_w \Delta_w + \mathcal{W} \cdot \mathcal{J} \cdot \Gamma \cdot \Xi + \mathcal{J} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{W} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + 2 \cdot \mathcal{I} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{L} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{I} \cdot \mathcal{L} \cdot \Gamma \cdot \Xi + \mathcal{I} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{L} \cdot \Gamma \cdot \Xi + \mathcal{L} $
Número de variáveis contínuas	$ \mathcal{L} \cdot \mathcal{I} + \mathcal{J} + \mathcal{I} \cdot \mathcal{L} \cdot \Gamma \cdot \Xi + \mathcal{W} \cdot \mathcal{I} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{L} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{W} \cdot \mathcal{K} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{T} \cdot \Gamma \cdot \Xi + \mathcal{W} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{W} \cdot \mathcal{I} \cdot \mathcal{T} \cdot \Xi + \mathcal{W} \cdot \mathcal{K} \cdot \mathcal{T} \cdot \Gamma \cdot \Xi + \Xi \cdot \sum_w \Delta_w $
Número de variáveis binárias	$ \mathcal{J} $
Número de variáveis inteiras	$ \mathcal{I} \cdot \mathcal{J} \cdot \mathcal{L} \cdot \Gamma \cdot \Xi $

Note que, em relação ao modelo anterior, o modelo FRFSDC possui um número maior de restrições e variáveis contínuas, mas o número de variáveis discretas é o mesmo.

Uma apresentação resumida do modelo RFFSDC encontra-se no Apêndice C.

Note que os subproblema de localização, transporte e dimensionamento da frota, que envolvem as variáveis \mathbf{N} , $\mathbf{N}'(\xi)$, $\mathbf{P}(\xi)$, $\mathbf{V}(\xi)$, $\mathbf{I}^d(\xi)$, $\mathbf{I}^{rc}(\xi)$ e as restrições (3.4)-(3.11), são iguais em ambos os modelos. Assim, os modelos se diferenciam apenas pelo subproblema de atendimento da demanda, que envolve as variáveis $\mathbf{Z}(\xi)$, $\mathbf{U}(\xi)$ e restrições (3.2), (3.3) no modelo FRFSMP e as variáveis $\mathbf{Z}'(\xi)$, $\bar{\mathbf{U}}(\xi)$, $\mathbf{U}'(\xi)$ e restrições (3.17)-(3.21) no modelo FRFSDC. Essa semelhança permite que possam ser obtidas soluções factíveis para um modelo a partir de soluções factíveis do outro modelo, i.e., definir as decisões de atendimento de um dos modelo a partir das decisões de transporte, localização e dimensionamento do outro modelo. Porém, dado que são modelos integrados, as decisões de atendimento influenciam o transporte, localização e dimensionamento da frota e portanto não é possível garantir que soluções ótimas possam ser encontradas dessa

forma.

O procedimento para obter soluções para o modelo FRFSDC (FRFSMP) a partir de soluções do modelo FRFSMP (FRFSDC) e apresentado a seguir:

1. Resolva o modelo FRFSDC (FRFSMP).
2. Fixe as variáveis \mathbf{N} , $\mathbf{N}'(\xi)$, $\mathbf{P}(\xi)$, $\mathbf{V}(\xi)$, $\mathbf{I}^d(\xi)$, $\mathbf{I}^{rc}(\xi)$.
3. Resolva o modelo FRFSMP (FRFSDC).

3.3 Modelos bi-objetivo

Nos modelos FRFSMP e FRFSDC apresentados, há na função objetivo dois tipos de custos, o humanitário e o logístico. Claramente há um *trade-off* entre eles. A fim de verificar o impacto desses tipos de custos nos modelos foram realizados testes com uma abordagem bi-objetivo para o problema integrado de localização, distribuição e dimensionamento da frota. O objetivo humanitário (F_1) considera a minimização da penalidade por demanda insatisfeita (ou o custo de privação no modelo FRFSDC), e o objetivo financeiro (F_2) consiste na minimização dos custos logísticos, compostos pelos custos de abertura e operação dos centros de auxílio, contratação de veículos, estoque e atendimento da demanda. Os dois objetivos para os modelos FRFSMP e FRFSDC são mostrados a seguir.

Para o modelo FRFSMP:

$$\min F_1 = UC \quad (3.23)$$

$$\min F_2 = YC^{oper} + NC + NC' + VC + ZC + IC \quad (3.24)$$

Para o modelo FRFSDC:

$$\min F'_1 = DC + DC' \quad (3.25)$$

$$\min F'_2 = YC^{oper} + NC + NC' + VC + ZC' + IC \quad (3.26)$$

No contexto da logística humanitária vários métodos de otimização multiobjetivo tem sido aplicados com sucesso (TZENG; CHENG; HUANG, 2007; VITORIANO et al., 2011; LIBERATORE et al., 2012; BOZORGI-AMIRI; JABALAMELI; AL-E-HASHEM, 2013; RATH; GENDREAU; GUTJAHR, 2015). Destacam-se entre eles a otimização hierárquica (*hierarchical optimization*), a programação por metas (*goal programming*) e o método epsilon-restrito (*epsilon constraint method*).

Na otimização hierárquica (ANANDALINGAM; FRIESZ, 1992) é definida uma ordem de prioridade (hierarquia) para as funções objetivo e o modelo é resolvido considerando apenas a função objetivo de maior prioridade. Após isso, o valor ótimo do objetivo prioritário é convertido numa restrição e o modelo é resolvido considerando apenas a função objetivo seguinte de maior prioridade. Isso é realizado sequencialmente até considerar todos os objetivos.

A programação por metas (ROMERO, 1991) difere da otimização hierárquica pois, como o seu nome sugere, considera metas a serem atingidas para cada uma das funções objetivo e penaliza o desvio entre os objetivos e as metas estabelecidas. Na programação por metas, para cada objetivo pode define-se um peso que representa a sua importância.

O método epsilon-restrito (HAIMES; LASDON; WISMER, 1971), que consiste em minimizar (ou maximizar) um dos objetivos e considerar os demais objetivos em forma de restrições adicionais.

A Tabela 3.3 apresenta a formulação matemática bi-objetivo dos modelos FRFSMP e FRFSDC, de acordo com cada um dos métodos.

Tabela 3.3: Formulação matemática bi-objetivo dos modelos FRFSMP e FRFSDC.

Método	Modelo bi-objetivo FRFSMP	Modelo bi-objetivo FRFSDC
Otimização hierárquica	$\min F_2$ <i>s.a.</i> Restrições (3.2)-(3.15) $F_1 \leq \alpha \cdot F_1^*$	$\min F'_2$ <i>s.a.</i> Restrições (3.4)-(3.11),(3.17)-(3.22) $F'_1 \leq \alpha \cdot F'^*_1$
Programação por metas	$\min \omega \cdot \lambda_1 + (1 - \omega) \cdot \lambda_2$ <i>s.a.</i> Restrições (3.2)-(3.15) $F_1 - \lambda_1 \geq \bar{F}_1$ $F_2 - \lambda_2 \geq \bar{F}_2$ $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}^+$	$\min \omega \cdot \lambda_1 + (1 - \omega) \cdot \lambda_2$ <i>s.a.</i> Restrições (3.4)-(3.11),(3.17)-(3.22) $F'_1 - \lambda_1 \geq \bar{F}'_1$ $F'_2 - \lambda_2 \geq \bar{F}'_2$ $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}^+$
Epsilon-restrito	$\min F_1$ <i>s.a.</i> Restrições (3.2)-(3.15) $F_2 \leq \sigma$	$\min F'_1$ <i>s.a.</i> Restrições (3.4)-(3.11),(3.17)-(3.22) $F'_2 \leq \sigma$

em que:

- $F_1^*(F'^*_1)$ é o valor ótimo quando o modelo FRFSMP (FRFSDC) é resolvido considerando apenas minimizar o objetivo $F_1(F'_1)$. Analogamente para $F_2^*(F'^*_2)$.
- $\alpha \geq 1$ é um parâmetro que flexibiliza a abordagem hierárquica, permitindo que o objetivo prioritário $F_1(F'_1)$ não seja necessariamente atingido no seu valor ótimo $F_1^*(F'^*_1)$. Por exemplo, $\alpha = 2$ permite que o objetivo prioritário $F_1(F'_1)$ seja até duas vezes o valor ótimo $F_1^*(F'^*_1)$.
- $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}^+$ são as variáveis de decisão que determinam o desvio entre o valor dos objetivos

(F_1, F_2, F'_1, F'_2) e as metas propostas $(\bar{F}_1, \bar{F}_2, \bar{F}'_1, \bar{F}'_2)$ e ω representa o peso/importância atribuída aos objetivos. No método de programação por metas alguns autores utilizam na função objetivo o desvio sob o valor da meta definida, i.e., $\min \frac{\omega \cdot \lambda_1}{F_1^*} + \frac{(1-\omega) \cdot \lambda_2}{F_2^*}$, porém, nesse trabalho a meta para $F_2(F'_2)$ é definida como o valor ótimo do custo logístico quando não considerado o objetivo humanitário, i.e., $\bar{F}_2 = \bar{F}'_2 = 0$, e portanto não pode ser considerado como divisor.

- σ é um parâmetro que indica o limitante superior considerado para o objetivo $F_2(F'_2)$.

Observe que alterando os parâmetros α , ω e σ , podem ser obtidas diferentes soluções para os objetivos (F_1, F_2, F'_1, F'_2) nos métodos hierárquico, de programação por metas e epsilon-restrito, respectivamente. Na Seção A.5 do Apêndice A é apresentado a análise bi-objetivo dos modelos preliminares FRFS e FRFST.

Capítulo 4

MÉTODOS DE SOLUÇÃO

Conforme observado na revisão bibliográfica do Capítulo 2, diversos autores têm proposto métodos heurísticos para resolver problemas de localização de facilidades, localização-alocação e fluxo multi-produtos com frota heterogênea em situações de desastre, uma vez que muitos desses problemas são da classe NP-difícil. Este é o caso do problema de localização-distribuição com dimensionamento de frota tratado neste trabalho.

Considerando as decisões de atendimento da demanda, localização de centros de auxílio e dimensionamento da frota como conhecidas (fixas), i.e., considerando apenas o subproblema de transporte, o problema de localização-distribuição de produtos com dimensionamento da frota apresentado nesse trabalho pode ser reduzido, sem perda de generalidade, ao problema de fluxo inteiro de múltiplos produtos, assumindo que os veículos são os produtos a serem distribuídos. O subproblema de transporte pode ser modelado como um problema de fluxo dos diferentes tipos de veículos l num grafo $G = (V, E)$ onde V é um conjunto finito de vértices e E um conjunto finito de arestas, com $I \subseteq V$, $J \subseteq V$ e $(i, j) \subseteq E$. O arco (i, j) é um arco (aresta dirigida) que conecta os vértices i e j . Existem $|I| \cdot |J|$ caminhos possíveis para o fluxo de veículos. A capacidade dos caminhos é definida pela disponibilidade dos veículos (N_{li}) e pela capacidade dos arcos (k_{ijl}^{arc}). Os custos de todos os caminhos possíveis estão definidos pelo custo de transporte (c_{ijl}^v). O objetivo é minimizar o custo total de fluxo $\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in \mathcal{L}} c_{ijl}^v \cdot V_{ijl\tau}(\xi)$ em todos os caminhos (i, j) utilizados. O problema de fluxo inteiro multi-produto já foi mostrado ser NP-difícil (BRUNETTA; CONFORTI; FISCHETTI, 2000; SRIVASTAV; STANGIER, 2000).

Observe que, para cada decisão de localização e dimensionamento da frota, deve-se resolver o subproblema de fluxo inteiro de múltiplos produtos para cada cenário e período, i.e., vários subproblemas menores NP-difíceis devem ser resolvidos. Portanto, o problema de localização-distribuição com dimensionamento de frota tratado nesse trabalho é, pelo menos, NP-difícil. De fato, testes computacionais preliminares evidenciaram a dificuldade do solver CPLEX em gerar

soluções de boa qualidade dentro de um tempo computacional razoável. Por essa razão, esse trabalho apresenta três propostas de heurísticas: heurísticas do tipo *relax-and-fix*; *heurísticas fix-and-optimize*; e uma heurística de decomposição em duas fases. A calibração do solver MIP do CPLEX também foi realizada no intuito de testar as estratégias mais adequadas para os tipos de instâncias propostas. A seguir, são apresentados os detalhes dos métodos propostos.

4.1 Estratégias CPLEX

Tendo em vista que o *solver* CPLEX versão 12.5.1 é um dos pacotes de otimização mais eficientes do mercado, ele foi utilizado na solução das instâncias dos modelos. Inicialmente, foi usado com seus parâmetros *default*. Apesar de sua reconhecida eficiência, o *solver* na sua versão *default* não foi capaz resolver as instâncias até otimalidade. Sendo grande a sua variedade de métodos de solução e possibilidade de variação de parâmetros nestes métodos, foram realizados testes computacionais com o objetivo de explorar melhor esta ferramenta e resolver de forma mais eficiente os modelos.

Em todos os testes computacionais realizados foi explorada a otimização em paralelo (*parallel mode*, *parallel threads*) disponível. Em tal opção, o CPLEX utiliza os núcleos (*cores*) do computador para melhorar o rendimento do método de solução. No método *branch-and-cut*, a otimização em paralelo é aplicada na ramificação e na solução dos subproblemas no nó raiz e nos nós da árvore utilizando diferentes algoritmos nos diferentes núcleos (ILOG, 2014). A otimização em paralelo foi testada em modo “oportunista”. Tal estratégia nem sempre gera a mesma solução (e tempo computacional) após o processo de otimização. Essa característica advém das diferenças no tempo dedicado às tarefas (operações) de cada estratégia testada e/ou na ordem em que as mesmas são executadas nos núcleos da máquina. Testes preliminares de otimização em paralelo foram realizados com os modelos FRFS e FRFST (Ver Seção A.6 do Apêndice A). Dado que na otimização em paralelo são utilizados diferentes métodos na solução dos subproblemas, não foram realizados testes computacionais para avaliar de forma individual cada um desses métodos, e.g., os algoritmos primal, dual e *network simplex* e o algoritmo de pontos interiores (*barrier*).

Nos testes, a geração de planos de corte, que implica na inclusão de outras equações/inequações no modelo, foi desligado. A conjectura é que ele deixa o modelo ainda mais intratável com a inclusão de novas restrições (FERREIRA; MORABITO; RANGEL, 2010) sem, entretanto, melhorar os limitantes e acelerar a convergência do método. A frequência de utilização (a cada quantos nós é aplicada) da heurística RINS (*Relaxation Induced Neighborhood Search*), que explora a vizinhança da solução incumbente com o objetivo de melhorá-la e diversificar a busca (DANNA; ROTHBERG; PAPE, 2005) é definida automaticamente no *solver* CPLEX *default*.

Não existe uma frequência padrão na utilização desta heurística. Aplicar a heurística RINS a cada nó pode levar a resolver subproblemas MIP similares entre eles sem obter melhorias, porém, aplicar a heurística RINS em intervalos maiores de nós pode reduzir o benefício de sua utilização. Nesse estudo, a frequência de utilização foi alterada para cada 10 e 100 nós. O pré-solver, que ajuda a simplificar o problema eliminando redundâncias nas variáveis e restrições foi desligado, pois em alguns casos o problema reduzido, embora menor, pode ser mais difícil de ser resolvido (ILOG, 2014). O método *brach-and-cut* foi testado com ênfase em factibilidade e otimalidade. A ênfase em factibilidade pode ser uma configuração apropriada para modelos difíceis nos quais é difícil a prova de otimalidade de uma solução (ILOG, 2014). Adicionalmente, foram testadas diferentes estratégias para a seleção das variáveis e dos nós (*varsel*, *nodesel*). Para a seleção dos nós foram testadas a busca em profundidade, em que é escolhido o nó criado recentemente, e a seleção do nó com melhor *bound* (limitante), em que é escolhido o nó com o melhor valor de função objetivo associado na relaxação linear. Para a seleção das variáveis, foram testadas as estratégias de escolha da variável com máxima inactibilidade e da variável com mínima inactibilidade. Finalmente, foi ligada a heurística *local branching* (FISCHETTI; LODI, 2003), que similar à heurística RINS explora a vizinhança da solução incumbente. A Tabela 4.1 resume as estratégias CPLEX testadas. A estratégia CPX1 é a configuração *default* do *solver* CPLEX.

Tabela 4.1: Estratégias CPLEX testadas.

	<i>Default</i>	Planos de corte	Heurística RINS	Seleção dos nós *	Seleção das variáveis **	Ênfase MIP ***	Pré-solver	Heurística LB
CPX1	X							
CPX2	X	Off						
CPX3	X	Off	-1					
CPX4	X	Off	10					
CPX5	X	Off	100					
CPX6	X	Off	10	1				
CPX7	X	Off	10	2				
CPX8	X	Off	10	3				
CPX9	X	Off	10		1			
CPX10	X	Off	10		2			
CPX11	X	Off	10			1		
CPX12	X	Off	10			2		
CPX13	X	Off	10	3		1		
CPX14	X	Off	10		2	1		
CPX15	X	Off	10	3	2	1		
CPX16	X	Off	10	3	2	1	Off	
CPX17	X	Off	10	3	2	1		On

* 1: nó recentemente criado; 2: nó com melhor *bound*; 3: nó com melhor estimativa de solução inteira.

** 1: variável com máxima inactibilidade; 2: variável com mínima inactibilidade.

*** 1: ênfase em factibilidade; 2: ênfase em otimalidade.

É sabido que esses ajustes na configuração dos parâmetros do *solver* CPLEX podem representar melhorias na otimização de um determinado modelo matemático (HUTTER; HOOS; LEYTON-BROWN, 2009). Porém, a calibragem de parâmetros pode ser uma tarefa complexa devido à natureza combinatorial das escolhas. Assim, o foco neste trabalho não é encontrar a melhor

configuração dentro de todas as configurações dos parâmetros do *solver* CPLEX, mas sim analisar algumas configurações alternativas mais eficientes dada a estrutura do modelo.

4.2 Heurísticas *relax-and-fix*

Dado que os modelos matemáticos propostos envolvem múltiplos períodos, produtos e veículos, é possível explorar o uso de heurísticas de decomposição, como as heurísticas *relax-and-fix* na solução dos modelos. Essas heurísticas têm sido usadas com sucesso em diferentes classes de problemas, como em problemas de grande porte de dimensionamento e sequenciamento de lotes (BERALDI et al., 2006; FERREIRA; MORABITO; RANGEL, 2010) e problemas de localização de facilidades e de cadeia de suprimento estocásticos (ESCUDERO et al., 2009; ALBAREDA-SAMBOLA et al., 2013).

Na heurística *relax-and-fix*, o conjunto de variáveis inteiras de um problema de otimização inteira mista é particionado em P conjuntos disjuntos. Em cada iteração, apenas as variáveis de um conjunto são mantidas como inteiras, as demais variáveis inteiras são relaxadas e o subproblema resultante é resolvido. Se a solução do subproblema for factível, as variáveis do conjunto, ou parte delas, são fixadas em seu valor atual. A ideia central da heurística é deixar apenas um subconjunto de variáveis discretas a cada iteração para que o subproblema resultante seja pequeno e de rápida solução. O processo é repetido até encontrar soluções para todos os conjuntos da partição. A cada iteração pode ser estabelecido um tempo limite para resolver o subproblema, portanto, nem todos os subproblemas são necessariamente resolvidos até otimalidade. O algoritmo da heurística *relax-and-fix* é apresentado a seguir:

Algoritmo 1 Algoritmo *relax-and-fix*.

- 1: **Inicialização:** Definir o conjunto de partições Q_1, \dots, Q_P , definir critério de fixação, relaxar o problema inteiro misto.
 - 2: **para** $i \leftarrow 1$ **até** P **faça**
 - 3: manter as variáveis da partição Q_i inteiras
 - 4: resolver o subproblema MIP
 - 5: **se** solução encontrada for factível **então**
 - 6: fixar as variáveis de acordo com o critério de fixação
 - 7: **senão**
 - 8: parar
 - 9: **fim se**
 - 10: **fim para**
-

As decisões fundamentais que definem a heurística *relax-and-fix* são: partição das variáveis e

critérios de fixação. A decisão de partição do conjunto de variáveis e, a segunda é o critério de fixação de variáveis. Diversas estratégias de partição e fixação de variáveis podem ser utilizadas gerando diferentes heurísticas *relax-and-fix*. A seguir são descritos os diferentes critérios utilizados nesse trabalho que definem as 6 heurísticas do tipo *relax-and-fix* propostas.

Partição por períodos. No problema de localização-distribuição de suprimentos, a cada período deve ser realizado o transporte e entrega de suprimentos às vítimas das áreas afetadas. Desta forma, o problema pode ser analisado como um conjunto de subproblemas monopériodo que são integrados para obter soluções ao longo do horizonte de operações humanitárias. Duas estratégias *relax-and-fix* são propostas com base nesta partição, RFX1 (*forward*) e RFX2 (*backward*). São consideradas como variáveis inteiras de um período as variáveis que dependem dos subperíodos do período, i.e., $V_{ijl\tau}(\xi) : \tau \in \Gamma(t), t \in \mathcal{T}$.

Partição por cenários. Similar à partição por período, o problema pode ser dividido em vários subproblemas por cenário. Assumindo que os cenários estão ordenados do melhor caso ($\xi = 1$) para o pior caso ($\xi = |\Xi|$), duas estratégias são implementadas com base nesta partição, RFX3 (*forward*) e RFX4 (*backward*).

Partição por períodos e cenários. Nesta partição, as variáveis são inicialmente divididas por período. Depois, dentro de cada período, é realizada uma partição por cenários. Os subproblemas obtidos têm um número menor de variáveis discretas em cada partição, em comparação às estratégias descritas anteriormente. Porém, o número de iterações que devem ser realizadas é maior uma vez que há mais subproblemas. Dois estratégias foram implementada com base nesta característica, RFX5(período *Forward* e cenário *forward*) e RFX6(período *backward* e cenário *forward*).

A Tabela 4.2 resume as características das heurísticas *relax-and-fix* (RFX1-RFX6) propostas nesse trabalho.

Tabela 4.2: Diferentes estratégias *relax-and-fix* testadas.

Estratégia <i>relax-and-fix</i>	Partição das variáveis	Variáveis fixadas em cada iteração
RFX1	Por período (<i>forward</i>).	$V_{ijl\tau}(\xi), P_{wijl\tau}(\xi) : \tau \in \Gamma(t)$
RFX2	Por período (<i>backward</i>).	$V_{ijl\tau}(\xi), P_{wijl\tau}(\xi) : \tau \in \Gamma(t)$
RFX3	Por cenário (<i>forward</i>).	$V_{ijl\tau}(\xi), P_{wijl\tau}(\xi)$
RFX4	Por cenário (<i>backward</i>).	$V_{ijl\tau}(\xi), P_{wijl\tau}(\xi)$
RFX5	Por período (<i>forward</i>) e cenário (<i>forward</i>).	$V_{ijl\tau}(\xi), P_{wijl\tau}(\xi) : \tau \in \Gamma(t)$
RFX6	Por período (<i>backward</i>) e cenário (<i>forward</i>).	$V_{ijl\tau}(\xi), P_{wijl\tau}(\xi) : \tau \in \Gamma(t)$

4.3 Heurísticas *fix-and-optimize*

Para algumas instâncias grandes, nem a relaxação linear dos modelos é resolvida no limite de tempo de 3.600 segundos. Portanto, a heurística *relax-and-fix*, que é baseada na relaxação dos modelos, pode não dar bons resultados nesse tipo de instâncias. Por outro lado, para qualquer instância dos modelos, existe uma solução factível trivial que consiste em não realizar distribuição dos depósitos aos centros de auxílio, ou seja, não realizar atendimento às áreas afetadas. Esta solução trivial, mesmo ruim, porém, é fácil e rápida de ser construída. Baseado nisso, é proposta uma heurística de melhoria *fix-and-optimize*.

A heurística *fix-and-optimize* é similar à *relax-and-fix*, porém, em cada iteração ao invés de relaxar as variáveis inteiras das demais partições, estas são fixadas nos valores inteiros da solução incumbente, o que torna os subproblemas mais simples. A heurística *fix-and-optimize* surgiu como uma melhoria da heurística *relax-and-fix* (POCHET; WOLSEY, 2006; FURLAN, 2011) e têm sido utilizada principalmente para problemas de dimensionamento de lotes (HELBER; SAHLING, 2010; SEEANNER; ALMADA-LOBO; MEYR, 2013). É uma heurística de melhoria, pois é necessária uma solução inicial factível a partir da qual se começa o algoritmo. Diferente da heurística *relax-and-fix*, na heurística *fix-and-optimize* sempre é encontrada uma solução factível a cada iteração.

Na heurística *fix-and-optimize*, o conjunto de variáveis inteiras de um problema de otimização inteira mista é particionado em P conjuntos. A cada iteração, apenas as variáveis de um conjunto são definidas como inteiras, as demais variáveis inteiras são fixadas nos valores da solução incumbente e o subproblema resultante é resolvido. Se a solução do subproblema é melhor que a solução incumbente, esta é substituída. O processo é repetido até que a solução dos subproblemas não gere melhoria na solução incumbente, ou até atingir outro critério de parada como número de iterações e/ou tempo. O algoritmo da heurística *fix-and-optimize* é apresentado a continuação:

Algoritmo 2 Algoritmo *fix-and-optimize*.

```
1: Inicialização: Encontrar solução inicial, definir o conjunto de partições  $Q_1, \dots, Q_i, \dots, Q_P$ .
2: sol_incumbente  $\leftarrow$  solução inicial
3: N_iter  $\leftarrow$  número de iterações
4: para j  $\leftarrow$  1 até N_iter faça
5:   para i  $\leftarrow$  1 até P faça
6:     se critério de parada não for atingido então
7:       Fixar variáveis discretas dos conjunto diferentes a  $Q_i$  nos valores de sol_incumbente
8:       resolver o subproblema MIP
9:       se solução do subproblema for melhor que sol_incumbente então
10:        sol_incumbente  $\leftarrow$  solução do subproblema
11:     fim se
12:   senão
13:     Parar
14:   fim se
15: fim para
16: fim para
```

Note que, assim como na heurística *relax-and-fix*, na heurística *fix-and-optimize* são definidos critérios de partição das variáveis discretas. Nesse trabalho, as partições de variáveis utilizadas na heurística *fix-and-optimize* são iguais às utilizadas na heurística *relax-and-fix* (Tabela 4.2). Elas serão denotadas por FXO1-FXO6.

Adicionalmente, foi proposta uma heurística FXO7, que é similar à heurística FXO2. Porém, diferente das estratégias *fix-and-optimize* clássicas, nas quais a cada iteração (partição) apenas as variáveis inteiras das demais partições são fixadas nos valores da solução incumbente, na heurística FXO7 são fixadas adicionalmente as variáveis contínuas de transporte $P_{wijl\tau}(\xi)$ das demais partições.

4.4 Heurística de decomposição em duas fases

A heurística de decomposição em duas fases DHIS (*Decomposition Heuristic for Initial Solution*) resolve dois problemas, um LP e um MIP, em sequência. Na primeira fase, é resolvido um modelo LP baseado no modelo original (FRFSMP/FRFSDC). No modelo LP não são consideradas as variáveis relacionadas ao dimensionamento da frota (\mathbf{N} , $\mathbf{N}'(\xi)$, $\mathbf{V}(\xi)$) e são relaxadas as variáveis de operação dos centros de auxílio (\mathbf{Y}^{oper}). Consequentemente, não são consideradas as restrições (3.7)-(3.11) que envolvem as decisões de dimensionamento da frota e são acrescentadas as restrições (4.2) e (4.3) com o objetivo de garantir que a solução obtida seja factível para o

problema original. Após resolver o modelo LP, são fixadas as decisões de transporte ($\mathbf{P}(\xi)$), atendimento ($\mathbf{Z}(\xi)$, $\mathbf{U}(\xi)$) e estoques ($\mathbf{I}^{rc}(\xi)$, $\mathbf{I}^d(\xi)$) e resolvido o problema original inteiro misto na segunda fase. O objetivo é obter soluções de boa qualidade que possam ser utilizadas como solução inicial para acelerar a convergência das técnicas heurísticas propostas nas seções anteriores.

O procedimento heurístico descrito, aplicado aos modelo FRFSMP e FRFSDC, é apresentado a seguir:

Algoritmo 3 Heurística proposta para o modelo FRFSMP.

- 1: Fase 1: Resolva o modelo LP (3.2)-(3.6),(4.1)-(4.4).
 - 2: Fixe as variáveis $\mathbf{P}(\xi)$, $\mathbf{Z}(\xi)$, $\mathbf{U}(\xi)$, $\mathbf{I}^{rc}(\xi)$, $\mathbf{I}^d(\xi)$.
 - 3: Fase 2: Resolva o modelo FRFSMP original (3.1)-(3.15).
-

Algoritmo 4 Heurística proposta para o modelo FRFSDC.

- 1: Fase 1: Resolva o modelo LP (3.4)-(3.6),(3.17)-(3.21), (4.2),(4.3), (4.5).
 - 2: Fixe as variáveis $\mathbf{P}(\xi)$, $\mathbf{Z}'(\xi)$, $\bar{\mathbf{U}}(\xi)$, $\mathbf{U}'(\xi)$, $\mathbf{I}^{rc}(\xi)$, $\mathbf{I}^d(\xi)$.
 - 3: Fase 2: Resolva o modelo FRFSDC original (3.4)-(3.14), (3.16)-(3.22).
-

O modelo LP baseado no modelo FRFSMP é apresentado a seguir.

Função objetivo

$$\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{j \in \mathcal{J}} \alpha_j^{oper} \cdot Y_j^{oper} + \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \delta_{kj} \cdot Z_{wkjt}(\xi) + \\
& \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \phi_w^+ \cdot I_{wjt}^{rc}(\xi) + \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \phi_w^- \cdot U_{wjt}(\xi) + \\
& \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \left(\frac{\beta_l}{|\mathcal{T}|} + \beta_l' + \gamma_{ijl} \right) \cdot \left(\frac{b_w}{2k_l^v} + \frac{b_w'}{2k_l'^v} \right) \cdot P_{wijkl(\tau)}(\xi). \tag{4.1}
\end{aligned}$$

Restrições

As restrições (3.2)-(3.6) são definidas como no modelo FRFSMP. Outras restrições foram acrescentadas conforme segue.

$$\begin{aligned}
\sum_{\tau'=\tau-(2\ell_{ijl}-1)}^{\tau} \frac{\sum_{w \in \mathcal{W}} b_w \cdot P_{wijkl(\tau')}(\xi)}{k_l^v} &\leq (k_{ijl}^{arc} - 2\ell_{ijl}) \cdot u_{ijlt}(\xi), \\
&\forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \tau \in \Gamma(t), t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \tag{4.2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{\tau'=\tau-(2\ell_{ijl}-1)}^{\tau} \frac{\sum_{w \in \mathcal{W}} b_w' \cdot P_{wijkl(\tau')}(\xi)}{k_l'^v} &\leq (k_{ijl}^{arc} - 2\ell_{ijl}) \cdot u_{ijlt}(\xi), \\
&\forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \tau \in \Gamma(t), t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \tag{4.3}
\end{aligned}$$

$$\mathbf{Y}^{oper}, \mathbf{P}(\xi), \mathbf{Z}(\xi), \mathbf{I}^{rc}(\xi), \mathbf{U}(\xi), \mathbf{I}^d(\xi) \in \mathbb{R}^+, \forall \xi \in \Xi. \tag{4.4}$$

A função objetivo (4.1) diferencia-se da função objetivo (3.1) em relação aos custos de transporte e contratação de veículos. No modelo LP, esses custos são determinados por meio de uma aproximação do número de veículos utilizados ($(\frac{b_w}{2k_l^v} + \frac{b'_w}{2k_l'^v}) \cdot P_{wijkl(\tau)}(\xi)$). Note que, se por um lado o custo total de transporte é subestimado por não considerar uma variável inteira mas a variável contínua $P_{wijkl(\tau)}(\xi)$, por outro lado os custos de contratação de primeiro e segundo estágio são superestimados ao penalizar a utilização de veículos e não, de fato, a sua contratação. As restrições (4.2) e (4.3) são equivalentes às restrições (3.7), (3.8) e (3.11) do modelo FRFSMP, nas quais se considera o peso e volume dos veículos para calcular o número de veículos utilizados e restringir a utilização de veículos à capacidade das rotas. Para garantir a factibilidade do problema inteiro na restrição de capacidade das rotas (3.11), reduziu-se a capacidade das rotas k_{ijl}^{arc} em $2\ell_{ijl}$ unidades, pois, no pior caso cada parcela do somatório $\sum_{\tau'=\tau-(2\ell_{ijl}-1)}^{\tau} \frac{\sum_{w \in \mathcal{W}} b_w \cdot P_{wijkl(\tau')}(\xi)}{k_l^v}$ (que tem $\tau + 1 - (\tau - (2\ell_{ijl} - 1)) = 2\ell_{ijl}$ parcelas) deve ser aproximada para cima ao considerar a variável inteira $V_{ijl\tau}(\xi)$ no lugar de $\frac{\sum_{w \in \mathcal{W}} b_w \cdot P_{wijkl\tau}(\xi)}{k_l^v}$ no problema original.

O modelo LP baseado no modelo FRFSDC é apresentado a seguir.

Função objetivo

$$\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{j \in \mathcal{J}} \alpha_j^{oper} \cdot Y_j^{oper} + \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \delta_{kj} \cdot Z_{wkjt}(\xi) + \\
& \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \phi_w^+ \cdot I_{wj t}^{rc}(\xi) + \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{\delta \in \Delta_w} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot (g_w(\delta) - g_w(\delta - 1)) \cdot U'_{w\delta}(\xi) + \\
& \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \max\{g_w(|\Delta_w|) - g_w(|\Gamma| - f'_t), 0\} \cdot \bar{U}_{wkt|\Gamma|} + \\
& \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \left(\frac{\beta_l}{|\mathcal{T}|} + \beta'_l + \gamma_{ijl} \right) \cdot \left(\frac{b_w}{2k_l^v} + \frac{b'_w}{2k_l'^v} \right) \cdot P_{wijkl(\tau)}(\xi). \quad (4.5)
\end{aligned}$$

Restrições

Restrições (3.4)-(3.6), (3.17)-(3.21), (4.2) e (4.3) definidas anteriormente.

Neste caso, note que para construir uma solução factível para o modelo FRFSDC, no modelo LP não se consideram as restrições (3.2) e (3.3), são acrescentadas as restrições (3.17)-(3.21) e é utilizada a função objetivo (4.5) para considerar os custos de privação.

Capítulo 5

EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

O objetivo dos experimentos computacionais é analisar o desempenho dos modelos matemáticos propostos e avaliar a eficiência dos métodos de solução. Os modelos matemáticos propostos foram avaliados a partir de dados estimados com base no megadesastre da região serrana do Rio de Janeiro em 2011. O desastre aconteceu entre os dias 11 e 12 de Janeiro de 2011 na região Serrana do Rio de Janeiro, atingindo áreas rurais e urbanas e comprometendo o abastecimento de água, energia elétrica e telefone fixo. Houve fortes chuvas, que ocasionaram deslizamento de encostas, rolamento de blocos de pedras e enchentes. Eventos que são característicos da região serrana brasileira e que a consolidaram como a região brasileira com maior quantidade de vítimas fatais provocadas por desastres naturais (BUSCH; AMORIM, 2011; RIO DE JANEIRO, 2011).

Os modelos foram programados no *software* GAMS 24.1.3 e resolvidos com o *solver* CPLEX 12.5.1 num computador com 16 GB de memória RAM, processador Intel Core i7 e sistema operacional Windows 7. Foi estabelecido como critério de parada um limite de tempo de 3.600 segundos ou um GAP de 1% de otimalidade.

5.1 Descrição dos dados

A seguir são apresentados os dados que foram usados na construção das instâncias.

Áreas afetadas. As áreas afetadas são as principais 10 cidades atingidas pelo desastre na Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011 (Tabela D.1 no Apêndice D).

Depósitos. Foram considerados 6 depósitos localizados nas maiores cidades afetadas pelo desastre, sendo 4 em Teresópolis, 1 em Petrópolis e 1 em Nova Friburgo (Tabela D.2 no Apêndice D).

Centros de auxílio. De acordo com o manual de planejamento da defesa civil Brasileira, instalações construídas para outras finalidades podem ser adaptadas como instalações de abrigo. Assim, ginásios esportivos, prédios escolares e igrejas são frequentemente utilizados como centros de auxílio. Nesse trabalho, considerou-se como possíveis localidades para centros de auxílio 40 pontos de coleta de doações nas cidades afetadas pelo desastre da Região Serrana. Foram considerados 10 localidades em Petrópolis, 18 em Teresópolis, 5 em Nova Friburgo, 2 em São Sebastião do Alto e uma localidade em cada uma das outras cidades afetadas. As localidades foram classificadas como no trabalho de Rawls e Turnquist (2010) em pequenas, médias e grandes. Como centros de auxílio pequenos, foram considerados igrejas, secretarias e prefeituras. Como centros auxílio grandes, foram considerados os batalhões de polícia, as sedes da Cruz Vermelha, as sedes dos bombeiros e as sedes da defesa civil. Os demais centros foram considerados como médios. A capacidade dos centros de auxílio (em volume) foi estimada por uma distribuição uniforme utilizando como valor médio as capacidades estabelecidas por Rawls e Turnquist (2010) para cada um dos tipos de localidades. As principais características dos tipos de centros de auxílio considerados são mostrados na Tabela D.3 no Apêndice D.

Dado que as possíveis facilidades candidatas a centros de auxílios são igrejas, escolas, prefeituras, ginásios, entre outros que já possuem uma infraestrutura, foi assumido um custo de abertura (c_j^x) dos centros auxílio de 200 reais para gastos de adequações menores dos locais. Os custos de operação dos centros de auxílio (c_j^y) incluem, principalmente, gastos com a equipe de ajuda humanitária e custos de manutenção e limpeza das instalações, e foram assumidos em 1.000, 600 e 300 reais por período para os centros de auxílio grandes, médios e pequenos, respectivamente.

Produtos. São considerados 5 tipos de produtos a serem distribuídos. Cestas básicas de alimentos, kits de higiene doméstica, kits de higiene pessoal, kits de produtos médicos e água. As necessidades de cada um dos tipos de produtos por pessoa foram estabelecidas de acordo com a literatura (IBGE, 2009; THE SPHERE PROJECT, 2011; ICRC, 2009; ALEM; CLARK, 2014). Os custos de estoque e atraso dos produtos foram estabelecidos como em Rawls e Turnquist (2010), em 0, 25 e 10 vezes o preço de compra do produto, para o estoque e atraso respectivamente. As características dos produtos são apresentadas na Tabela D.4 no Apêndice D.

Tipos de veículos. Considerou-se uma frota composta por caminhões semi pesados, barcos e helicópteros tipo esquilo. A velocidade média para os caminhões e barcos foi estabelecida em 30 km/hora de acordo com a velocidade média de segurança definida no manual de planejamento da defesa civil. Para os helicópteros, essa velocidade média foi estabelecida em 220 km/hora. As características dos veículos considerados podem ser observadas na Tabela D.5 no Apêndice D. O custo de transporte (c_{ijl}^v em BRL) e tempo de transporte (ℓ_{ijl} em horas) foram calculados da

seguinte maneira:

$$c_{ijl}^v = \frac{Custo_l}{Consumo_l} \cdot dist_{ij}, \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}. \quad (5.1)$$

$$\ell_{ijl} = \frac{dist_{ij}}{Velocidade_l}, \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}. \quad (5.2)$$

em que $Custo_l$, $Consumo_l$, $Velocidade_l$ referem-se ao custo de combustível, consumo de combustível e a velocidade do veículo l ; $dist_{ij}$ é a distância entre o depósito i e o centro de auxílio j determinada via *google maps*.

Custo de atendimento das áreas afetadas. Este custo tem como objetivo penalizar a distância entre as áreas afetadas e os centros de auxílio onde é realizado o atendimento. Foi assumido um custo proporcional à distância entre a cidade afetada e a cidade onde está localizado o centro de auxílio:

$$c_{kj}^z = \frac{dist_{kj}}{distmedia}, \forall k \in \mathcal{K}, j \in \mathcal{J}. \quad (5.3)$$

em que $dist_{kj}$ é a distância entre a cidade afetada k e a cidade onde está localizado o centro de auxílio j calculada via *google maps* e $distmedia$ é a distância média entre todas as cidades afetadas e todas as cidades onde estão localizados os centros de auxílio.

5.2 Geração de cenários

A geração de cenários foi baseada em dados históricos sobre o acontecimento de desastres relacionados a inundações e movimentos de massa no estado de Rio de Janeiro. Dentre as diferentes bases de dados pesquisadas (EM-DAT, 2015; ADRC, 2014; DARTMOUTH, 2014), considerou-se os dados do EM-DAT (Emergency Events Database), que cobrem a ocorrência desse tipo de desastres no estado do Rio de Janeiro no Brasil num período de 47 anos (1966-2013). Seguindo a categorização de desastres estabelecida por Eshghi e Larson (2008), na qual uma ocorrência é considerada um desastre se teve mais de 10 óbitos ou mais de 100 afetados, alguns desastres foram desconsiderados da análise.

Eshghi e Larson (2008) classificam os desastres de acordo com o número de vítimas e número de pessoas afetadas em seis categorias: situação de emergência, situação de crise, desastre menor, desastre moderado, desastre maior e catástrofe. A Tabela 5.1 ilustra o número de óbitos e afetados nos desastres ocorridos entre 1966 e 2013 no estado do Rio de Janeiro, relacionados com inundações ou movimentos de massa e com um número de pessoas afetadas maior do que 100. Dos 13 desastres considerados, a maioria foi classificado como situação de crise (5) e nenhum

como uma catástrofe.

Tabela 5.1: Desastres relacionados a inundações e movimentos de massa com mais de 100 pessoas afetadas no estado do Rio de Janeiro entre 1966 e 2013.

Ano	Total óbitos	Total afetados	Tipo de desastre ¹
1966	350	4.000.000	Desastre maior
1988	289	3.020.734	Desastre maior
1990	7	800	Situação de emergência
1992	25	1.000	Situação de emergência
2001	50	1.946	Situação de crise
2003	7	2.000	Situação de crise
2007	6	2.272	Situação de crise
2008	9	50.953	Desastre menor
2010	256	74.938	Desastre menor
2011	909	304.562	Desastre moderado
2013	4	200.000	Desastre moderado
2013	30	1.510	Situação de crise
2013	2	2.000	Situação de crise

¹ Classificação baseada em Eshghi e Larson (2008).

A partir dos dados na Tabela 5.1 foi definida a probabilidade de ocorrência de cada um dos tipos de desastres (Ver Seção D.2 do Apêndice D). A frequência relativa (assumida como probabilidade $\pi(\xi)$) e o número médio de afetados dos diferentes tipos de desastres considerados são apresentados nas colunas 2 e 3 da Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Valor dos parâmetros estocásticos de acordo ao tipo de desastre.

Tipo de desastre	Frequência relativa	Número de afetados (d)	Suprimentos	Proporção de estoque útil	Disponibilidade dos arcos		
					Cam.	Bar.	Hel.
Emergência	15,93%	900	$U(0.95, 1.05) \cdot d$	$U(0.85, 1.00)$	80,0%	20,0%	95,0%
Crise	37,63%	1.950	$U(0.90, 1.10) \cdot d$	$U(0.80, 0.95)$	65,0%	30,0%	85,0%
Menor	14,89%	62.945	$U(0.85, 1.15) \cdot d$	$U(0.75, 0.90)$	50,0%	40,0%	75,0%
Moderado	16,18%	252.579	$U(0.80, 1.20) \cdot d$	$U(0.70, 0.85)$	35,0%	50,0%	65,0%
Maior	15,37%	3.504.975	$U(0.75, 1.25) \cdot d$	$U(0.65, 0.80)$	20,0%	60,0%	55,0%
Catástrofe	0,10%	10.000.001	$U(0.70, 1.30) \cdot d$	$U(0.60, 0.75)$	5,0%	70,0%	45,0%

A estes cenários gerados, foi acrescentado um sexto cenário que considera o tipo de desastre “catástrofe”, com uma probabilidade relativamente baixa (0,1%) em algumas instâncias, com o objetivo de analisar as soluções do modelo ante um desastres de pior caso. Adicionalmente, para algumas instâncias foram considerados 13 cenários de acordo com cada um dos valores da Tabela 5.1.

Uma vez obtidos os cenários do número de vítimas, o número total de afetados foi desagregado ao longo do horizonte utilizando um gerador de números aleatórios baseado numa distribuição uniforme discreta e que considera, em alguns períodos, picos de demanda. Após desagregar o número total de afetados para cada um dos períodos do horizonte, o número de afetados em cada

cidade afetada foi estimado de acordo com a sua densidade populacional.

Dado que não foi possível encontrar dados sobre o suprimento de produtos nos desastres ocorridos no Rio de Janeiro ao longo dos últimos anos, foi assumido o número de suprimentos como uma proporção da demanda que deve ser atendida, apresentando variações de acordo com o tipo de desastre. Assim, assumiu-se que desastres piores geram mais suprimentos. Para cada tipo de desastre, os suprimentos foram calculados aleatoriamente utilizando uma distribuição uniforme (coluna 4 da Tabela 5.2).

A proporção de produtos estocados nos centros de auxílio que permanece utilizável foi gerada utilizando uma distribuição uniforme contínua de acordo com o tipo de desastre. Como não se tem informação disponível deste parâmetro, foi assumido que, ao aumentar a gravidade do desastre aumenta-se o impacto do desastre sobre o estoque nos centros de auxílio (que estão localizados nas áreas afetadas) (coluna 5 da Tabela 5.2).

Assumiu-se que desastres mais graves reduzem as rotas disponíveis para os caminhões (cam. em coluna 6 da Tabela 5.2). Para os barcos, assumiu-se que, quanto maior a gravidade de um desastre (inundações mais fortes), maior são as rotas disponíveis para este tipo de veículo (bar. em coluna 7 da Tabela 5.2). Finalmente, foi assumido que os helicópteros são veículos menos suscetíveis às consequências do desastre, porém, também foi estabelecido que quanto maior a gravidade do desastre menor as rotas disponíveis (hel. na coluna 8 da Tabela 5.2). A partir da porcentagem de rotas disponíveis para cada tipo de veículo, foram geradas aleatoriamente as rotas inutilizáveis.

5.3 Custos de privação

Em Holguín-Veras et al. (2013), os custos de privação são definidos como uma função do tempo de privação, em geral monotonamente crescente, pois é de se esperar que um incremento no tempo de privação implique num aumento no custo de privação. Além disso, a função de privação é usualmente não linear - devido ao impacto da falta de produtos nos seres humanos - e convexa, com respeito ao tempo de privação, pois o custo de privação aumenta de forma significativamente mais rápida do que o tempo de privação (HOLGUÍN-VERAS et al., 2013). Dependendo do tipo de desastre, alguns produtos essenciais à sobrevivência (água, alimentos, remédios) têm um custo de privação maior do que outros produtos (colchão, roupas, kit's de higiene doméstica, entre outros). Os custos de privação crescem até atingir o seu valor máximo no tempo limite de privação. Após esse tempo, considera-se que a demanda não pode ser mais atendida. Isto é devido ao fato de que, em situações de desastre, as vítimas após certo tempo privadas de alguns produtos saem das áreas afetadas à procura desses produtos ou até mesmo morrem pela falta

deles. Esse custo máximo de privação é considerado muito alto em relação aos custos logísticos do problema para priorizar o atendimento às vítimas.

Em Pérez-Rodríguez e Holguín-Veras (2015) foram propostas duas funções de privação, uma para a privação de produtos de alta prioridade (Q^H) e outra para a privação de produtos de baixa prioridade (Q^L), como mostrado a seguir:

$$Q^H(\delta) = e^{(1,5031+0,1172\cdot\delta)} - e^{1,5031} \quad (5.4)$$

$$Q^L(\delta) = e^{(0,065\cdot\delta)} - 1 \quad (5.5)$$

Com base nas equações (5.4) e (5.5), foram propostas funções de custos de privação para cada um dos produtos considerados nesse trabalho. Os produtos foram classificados como sendo de alta ou baixa prioridade e, para cada um deles, foi definido um custo e tempo máximo de privação. O custo de privação do produto w é definido pela função a seguir:

$$g_w(\delta) = NP_w \cdot \frac{CM_w}{Q_w(|\Delta_w|)} \cdot Q_w(\delta) \quad (5.6)$$

em que NP_w é o número de pessoas afetadas pela falta de uma unidade de produto w ; CM_w é o custo máximo por uma vítima não ser atendida com o produto w no horizonte de operações humanitárias; $Q_w(\delta) = Q^H(\delta)$ para produtos considerados prioritários e $Q_w(\delta) = Q^L(\delta)$ para produtos considerados de baixa prioridade; $|\Delta_w|$ é o tempo máximo de privação do produto w .

Analogamente às funções propostas em Pérez-Rodríguez e Holguín-Veras (2015), a função de custos (5.6) é monotonicamente crescente, não linear e convexa com respeito ao tempo de privação. Por outro lado, diferente das funções propostas em Pérez-Rodríguez e Holguín-Veras (2015), a multiplicação por NP_w permite considerar o número de pessoas que são afetadas pela falta de uma unidade de produto w , dado que em muitas situações de desastre é comum que a distribuição de alguns suprimentos seja realizada para grupos de pessoas (famílias, por exemplo); a multiplicação por $\frac{CM_w}{Q_w(|\Delta_w|)}$ garante que, após $|\Delta_w|$ subperíodos de privação, o custo total de privação seja igual ao custo máximo de privação por pessoa (CM_w) multiplicado por o número de pessoas afetadas (NP_w), i.e., $g_w(\delta) = NP_w \cdot \frac{CM_w}{Q_w(|\Delta_w|)} \cdot Q_w(|\Delta_w|) = NP_w \cdot CM_w$.

A Tabela 5.3 apresenta os valores NP_w , CM_w , $|\Delta_w|$ e o custo de privação $g_w(\delta)$ para o conjunto de produtos considerados nesse trabalho. Note que o custo máximo CM_w de uma pessoa não ser atendida com produtos como água e alimentos é maior do que o de uma pessoa não receber um kit de higiene doméstica ou higiene pessoal. Também são apresentados o custo de privação $g_w(1)$ e $g_w(|\Delta_w|)$ pela falta de produtos por 1 e $|\Delta_w|$ horas, respectivamente. Dado que o horizonte de planejamento é curto, foi considerado um tempo de privação máximo de 6

dias (144 horas) para produtos como kit's de higiene pessoal e kit's de higiene doméstica. De acordo com a literatura o tempo que uma pessoa pode viver sem água e/ou alimentos depende de muitos fatores como as condições do clima ou o estado físico da pessoa, entre outros (LATHAM, 2002; POPKIN; ROSENBERG, 2011). Nesse trabalho foi considerado que uma pessoa pode permanecer sem receber água por, no máximo, 3 dias (72 horas) e sem receber alimentos por, no máximo, 4 dias (96 horas).

Tabela 5.3: Função de custo de privação para os produtos considerados.

w	Produto	$ \Delta_w $ (horas)	CMP_w^1 (R\$)	NP_w	$g_w(\delta)^2$	$g_w(1)$ (R\$)	$g_w(\Delta_w)$ (R\$)
1	Água	72	140.000	1	$6,7404 \cdot Q^H(\delta)$	3,77	140.000
2	Cesta de alimentos	96	140.000	5	$2,0229 \cdot Q^H(\delta)$	1,13	700.000
3	Kit medicinal	96	140.000	90	$36,4128 \cdot Q^H(\delta)$	20,35	12.600.000
4	Kit de higiene pessoal	144	14.000	1	$1,2055 \cdot Q^L(\delta)$	0,08	14.000
5	Kit de higiene domestica	144	14.000	5	$6,0275 \cdot Q^L(\delta)$	0,40	70.000

¹ Baseado nos valores utilizados em Holguín-Veras et al. (2013).

² $Q^H(\delta)$ e $Q^L(\delta)$ dados pelas equações 5.4 e 5.5, respectivamente.

A Figura 5.3 apresenta o comportamento do custo de privação $g_w(\delta)$ em função do tempo de privação δ (até o custo de 14.000 reais) para as primeiras 144 horas de privação dos produtos considerados. Claramente, a função de custos de privação (5.6) é uma função de crescimento exponencial em relação ao tempo de privação δ .

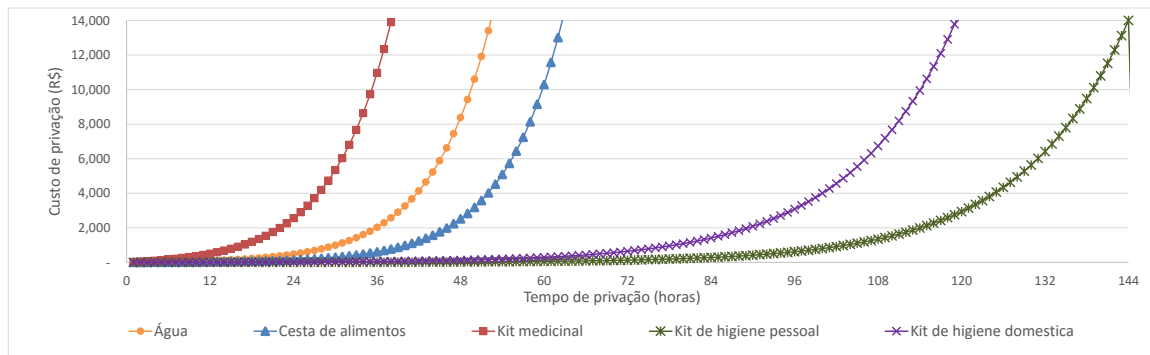


Figura 5.1: Gráfico do custo de privação $g_w(\delta)$ em função do tempo de privação.

5.4 Instâncias propostas

A partir dos dados descritos nas seções anteriores (5.1, 5.2 e 5.3) foram geradas três instâncias (S1, M1, L1). A instância S1 considera 3 depósitos localizados em 3 cidades (Petrópolis, Teresópolis, Nova Friburgo), 8 centros de auxílio localizados em 5 cidades (Petrópolis, Teresópolis, Nova Friburgo, Sapucaia, São Sebastião do Alto), 5 áreas afetadas (Teresópolis, Petrópolis, Nova Friburgo, São José do vale do Rio Preto, Bom Jardim), 3 tipos de produtos (água, cesta básica

de alimentos, kit medicinal), 2 tipos de veículos (caminhões e barcos), 3 cenários (emergência, crise, desastre menor) e 5 períodos (dias).

A instância M1 considera 3 depósitos localizados em 3 cidades (Petrópolis, Teresópolis, Nova Friburgo), 20 centros de auxílio localizados em 8 cidades (Petrópolis, Teresópolis, Nova Friburgo, Sumidouro, Santa Maria Madalena, Trajano de Moraes, Sapucaia, São Sebastião do Alto), 5 áreas afetadas (Teresópolis, Petrópolis, Nova Friburgo, São José do vale do Rio Preto, Bom Jardim), 5 tipos de produtos (Tabela D.4), 3 tipos de veículos (caminhões, barcos, helicópteros), 5 cenários (emergência, crise, desastre menor, desastre moderado, desastre maior) e 10 períodos (dias).

A instância L1 considera 6 depósitos (Tabela D.2), 40 centros de auxílio localizados nas 10 cidades afetadas, 10 áreas afetadas (Tabela D.1), 5 tipos de produtos (Tabela D.4), 3 tipos de veículos (caminhões, barcos, helicópteros), 6 cenários (emergência, crise, desastre menor, desastre moderado, desastre maior, catástrofe) e 20 períodos (dias).

A partir das três instâncias (S1, M1 e L1), foram construídas 27 instâncias, a partir de modificações em alguns parâmetros. Essas modificações estão apresentadas na Tabela 5.4. O objetivo é analisar o comportamento do modelo em diversas situações e obter insights que podem ser úteis no processo de tomada de decisão. Foram exploradas situações com as seguintes características: o suprimento é alto (S2, M2, L2); a disponibilidade dos veículos é limitada (S3, M3, L3); com um conjunto maior de 13 cenários (S4, M4, L4); a capacidade dos centros de auxílio é reduzida (S5, M5, L5); a capacidade dos veículos é reduzida (S6, M6, L6); o custo de abertura dos centros de auxílio aumenta (S7, M7, L7); o tempo de transporte aumenta (S8, M8, L8); o suprimento e a demanda reduzidos (S9, M9, L9); o custo de contratação dos veículos no segundo estágio é maior (S10, M10, L10). Em todas as instâncias, a disponibilidade de veículos é limitada a 100 veículos de cada tipo no primeiro estágio.

Tabela 5.4: Conjunto de instâncias geradas.

Instâncias	Característica	\mathcal{I}	\mathcal{J}	\mathcal{K}	\mathcal{W}	\mathcal{T}	Ξ	\mathcal{L}	Γ
S1	Dados originais	3	8	5	3	5	3	2	120
S2	S1 com $q_{wit}(\xi)$ aumentado em 40%	3	8	5	3	5	3	2	120
S3	S1 com $k_1^n = 5$ e $k_2^n = 5$	3	8	5	3	5	3	2	120
S4	S1 com $ \Xi = 13$	3	8	5	3	5	13	2	120
S5	S1 com k_{wj}^{cp} e k_j^c reduzidos em 40%	3	8	5	3	5	3	2	120
S6	S1 com k_l^v e $k_l^{v'}$ reduzidos em 40%	3	8	5	3	5	3	2	120
S7	S1 com α_j^{oper} aumentado 10 vezes	3	8	5	3	5	3	2	120
S8	S1 com ℓ_{ijl} aumentado 3 vezes	3	8	5	3	5	3	2	120
S9	S1 com $q_{wit}(\xi)$ e $d_{wkt}(\xi)$ reduzidos em 50%	3	8	5	3	5	3	2	120
S10	S1 com β_l^i aumentado 10 vezes	3	8	5	3	5	3	2	120
M1	Dados originais	3	20	5	5	10	5	3	240
M2	M1 com $q_{wit}(\xi)$ aumentado em 40%	3	20	5	5	10	5	3	240
M3	M1 com $k_1^n = 10, k_2^n = 10$ e $k_3^n = 10$	3	20	5	5	10	5	3	240
M4	M1 com $ \Xi = 13$	3	20	5	5	10	13	3	240
M5	M1 com k_{wj}^{cp} e k_j^c reduzidos em 40%	3	20	5	5	10	5	3	240
M6	M1 com k_l^v e $k_l^{v'}$ reduzidos em 40%	3	20	5	5	10	5	3	240
M7	M1 com α_j^{oper} aumentado 10 vezes	3	20	5	5	10	5	3	240
M8	M1 com ℓ_{ijl} aumentado 3 vezes	3	20	5	5	10	5	3	240
M9	M1 com $q_{wit}(\xi)$ e $d_{wkt}(\xi)$ reduzidos em 50%	3	20	5	5	10	5	3	240
M10	M1 com β_l^i aumentado 10 vezes	3	20	5	5	10	5	3	240
L1	Dados originais	6	40	10	5	20	6	3	480
L2	L1 com $q_{wit}(\xi)$ aumentado em 40%	6	40	10	5	20	6	3	480
L3	L1 com $k_1^n = 15, k_2^n = 15$ e $k_3^n = 15$	6	40	10	5	20	6	3	480
L4	L1 com $ \Xi = 13$	6	40	10	5	20	13	3	480
L5	L1 com k_{wj}^{cp} e k_j^c reduzidos em 40%	6	40	10	5	20	6	3	480
L6	L1 com k_l^v e $k_l^{v'}$ reduzidos em 40%	6	40	10	5	20	6	3	480
L7	L1 com α_j^{oper} aumentado 10 vezes	6	40	10	5	20	6	3	480
L8	L1 com ℓ_{ijl} aumentado 3 vezes	6	40	10	5	20	6	3	480
L9	L1 com $q_{wit}(\xi)$ e $d_{wkt}(\xi)$ reduzidos em 50%	6	40	10	5	20	6	3	480
L10	L1 com β_l^i aumentado 10 vezes	6	40	10	5	20	6	3	480

5.5 Desempenho das estratégias de solução: modelo FRFSMP

Dois critérios foram utilizados para avaliar o comportamento dos métodos de solução: o tempo computacional medido em segundos, e a qualidade da solução medida pelo custo total da função objetivo e/ou o gap. Nas estratégias heurísticas, o tempo computacional refere-se ao tempo total empregado pelo *solver* CPLEX para resolver os subproblemas. O gap é definido como: $\text{gap} = \frac{\text{Solução_MIP-Limitante_inferior}}{\text{Solução_MIP}}$. Para analisar os resultados obtidos pelas estratégias propostas (ver Tabelas 4.1 e 4.2) e determinar qual delas é a melhor utilizou-se a ideia de perfis de desempenho de Dolan e Moré (2002). Os perfis de desempenho baseiam-se na função de distribuição acumulada $P(f, q) : \mathfrak{R} \mapsto [0, 1]$ da estratégia f em análise. A função $P(f, q)$ é definida por:

$$P(f, q) = \frac{|\{p \in P : \log_2(v(p, f)) \leq q\}|}{n_p}, \quad q \geq 0, \quad (5.7)$$

com,

$$v(p, f) = \frac{TC_{pf}}{\min\{TC_{pf} : f \in F\}}, \quad (5.8)$$

em que P é o conjunto de instâncias, com $p = 1, \dots, |P|$; $n_P = |P|$ é o número total de instâncias; F é o conjunto de estratégias, com $f = 1, \dots, |F|$; $v(p, f)$ é a razão de melhoria definida como a razão entre TC_{pf} que é, por exemplo, o tempo ou gap quando a instância p é resolvida com a estratégia f e $\min\{TC_{pf} : f \in F\}$ que é o menor tempo (ou gap) em que a instância p foi resolvida dentre todas as estratégias em F .

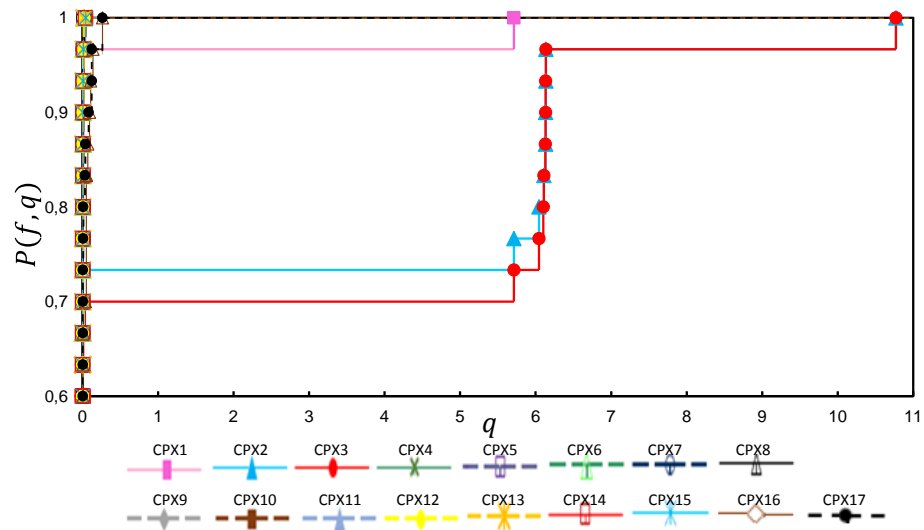
A função $P(f, q)$ indica a probabilidade da estratégia f estar dentro de um fator $q \in \mathfrak{R}$ da melhor razão possível. O valor de $P(f, q)$ quando $q = 0$ indica a fração das instâncias para as quais

valor de q quando $P(f, q) = 1$ indica que, para as instâncias nas que a estratégia f não atingiu a melhor solução, encontrou soluções que estão, no máximo, dentro de um fator 2^q vezes a melhor solução encontrada. A melhor estratégia é aquela que tenha o menor valor de q para $P(f, q) = 1$, ou seja, a que converge mais rapidamente para $P(f, q) = 1$.

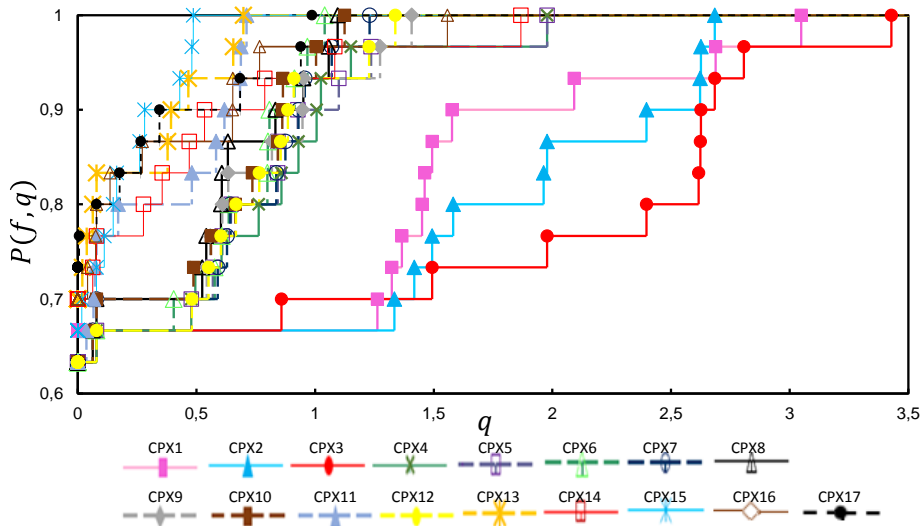
5.5.1 Resultados das estratégias CPLEX: modelo FRFSMP

As Figuras 5.2(a) e 5.2(b) mostram os perfis de desempenho do valor da função objetivo e do tempo computacional para as estratégias CPLEX testadas na solução do modelo FRFSMP. Os eixos vertical e horizontal mostram a função de distribuição acumulada $P(f, q)$ e fator q , respectivamente. A Tabela E.1 no Apêndice E mostra os valores extremos ($P(f, q)$ quando $q = 0$

e q quando $P(f, q) = 1$) da curva de perfis de desempenho das estratégias CPLEX.



(a) Função objetivo.



(b) Tempo computacional.

Figura 5.2: Perfis de desempenho para as estratégias CPLEX testadas com o modelo FRFSMP.

Para o modelo FRFSMP, em relação ao custo da função objetivo, observa-se na Figura 5.2(a) que varias estratégias tiveram um desempenho similar. CPX2 e CPX3 foram as estratégias com a pior convergência atingindo $P(f, q) = 1$ com valores de $q = 10,77$, enquanto a estratégia CPX1 apresentou um valor de $q = 5,71$. As demais estratégias apresentaram valores de q menores do que 0,26.

Em relação ao tempo computacional, similarmente ao resultado obtido no perfil de desempenho do valor da função objetivo, as estratégias CPX1, CPX2 e CPX3 foram as que apresentaram os piores resultados. Pode ser observado na Figura 5.2(b) que se destacam como boas as estratégias CPX15, CPX11 e CPX13, com valores de $q < 0,02$. Para as estratégias CPX11 e CPX13 o resultado foi similar. A estratégia CPX15 (CPX13) atingiu o melhor tempo para 66,7% (70,0%)

das instâncias e apresentou, para as demais instâncias, soluções que estão, no máximo, dentro de um fator $2^{0,49} \approx 1,4(2^{0,70} \approx 1,6)$ vezes o melhor tempo obtido. Como melhor estratégia foi escolhida CPX15, que foi a melhor em tempo computacional e uma das melhores em custo da função objetivo.

A Tabela 5.5 apresenta os resultados das estratégias CPX1(*default*) e CPX15(melhor estratégia CPLEX). Apresentam-se os valores médios da função objetivo, do tempo computacional e do gap para cada grupo de instâncias. Note que existe um ganho da CPX15, tanto em tempo quanto em gap. O custo médio reduziu 2,34% e o tempo computacional médio reduziu 13,73%. Para as instâncias pequenas e grandes, a média dos resultado foi similar nas duas estratégias CPX1 e CPX15. Para as instâncias grandes, as estratégias CPLEX não foram capazes de resolver a relaxação linear, e portanto, não conseguiram melhorar a solução inicial incumbente que é encontrada pelo método no pré-processamento, antes mesmo de começar a resolver a relaxação. Por outro lado, para todas as instâncias pequenas, ambas as estratégias CPLEX atingiram gaps menores do que 15% em menos de 200 segundos. Porém, a otimalidade dessas soluções não foi provada no tempo computacional limite (3.600 segundos). Foi observado que há dificuldade do *solver* em encontrar bons limitantes inferiores. Para as instâncias médias, a melhoria foi significativa tanto em tempo quanto em gap. Os resultados das estratégias CPX1 e CPX15 para todas as instâncias são apresentados na Tabela E.2 no Apêndice E.

Tabela 5.5: Resultados médios das estratégias CPX1 e CPX15 para o modelo FRFSMP.

Instância	CPX1			CPX15		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (seg.)	Gap (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (seg.)	Gap (%)
Pequenas	939.630	3.267	6,778	939.101	3.245	6,778
Médias	105.070.199	2.329	10,38	12.167.234	1.089	0,8710
Grandes	3.858.121.743	3.600	94,03	3.858.121.743	3.600	94,03
Média	1.321.377.190	3.066	37,06	1.290.409.359	2.645	33,89

De maneira geral, na estratégia CPX1 (*default*), o número de nós explorados na maioria das instâncias foi pequeno. De fato, para algumas instâncias, só foi explorado o nó raiz. O motivo disso acontecer é que o método *branch-and-cut* gera muitos planos de corte nos nós iniciais e não consegue avançar na exploração. Portanto, aplicar ou não a heurística RINS (e/ou outras heurísticas) ao longo da árvore não tem efeito quando os planos de corte estão ligados. Isso também foi evidenciado com testes computacionais preliminares realizados com os modelos FRFS e FRFST no Apêndice A. Por outro lado, desligar os planos de corte sem utilizar nenhuma outra heurística que melhore a convergência do método também não é uma boa estratégia, como observou-se com os resultados de CPX2 e CPX3. Desligar os planos de corte apresentou bons resultados apenas quando, simultaneamente, foi aumentada a frequência de utilização

da heurística RINS. Também se observou que, na resolução do modelo FRFSMP, o método *branch-and-cut* é mais rápido se utilizado com ênfase em factibilidade. Em relação à seleção dos nós e variáveis, a melhor estratégia é selecionar o nó com o melhor limitante (*best-bound*) e a variável com a menor infactibilidade.

Todos os subproblemas MIP das estratégias heurísticas foram posteriormente resolvidos utilizando a melhor configuração encontrada (CPX15).

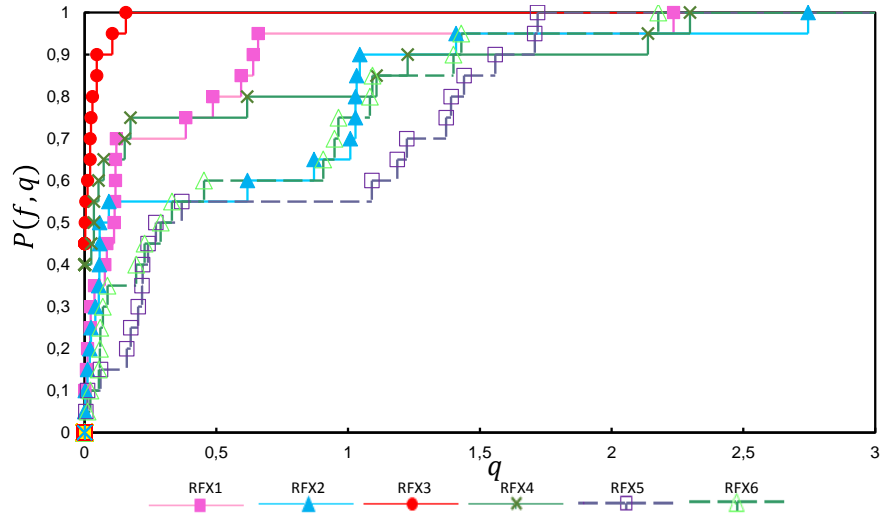
5.5.2 Resultados das heurísticas *relax-and-fix*: modelo FRFSMP

As Figuras 5.3(a) e 5.3(b) mostram os perfis de desempenho do valor da função objetivo e do tempo computacional das estratégias *relax-and-fix* (RFX1-RFX6) testadas com o modelo FRFSMP. A Tabela E.1 no Apêndice E mostra os valores extremos da curva de perfis de desempenho para as estratégias *relax-and-fix*.

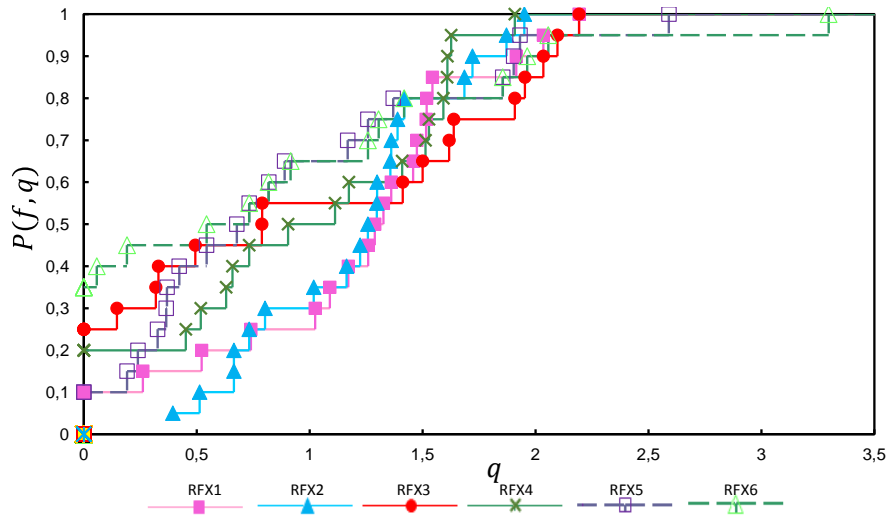
Em relação ao valor da função objetivo (Figura 5.3(a)), evidentemente a melhor estratégia foi RFX3, que atingiu o menor custo da função objetivo para 45% das instâncias e apresentou, para as demais instâncias, soluções que estão dentro de um fator de $2^{0.156} \approx 1.1$ vezes o menor custo obtido.

Em relação ao tempo computacional (Figura 5.3(b)), as melhores estratégias foram RFX4 e RFX2. Porém, essas estratégias estiveram entre as piores no critério do valor da função objetivo. RFX3 foi a terceira melhor estratégia em tempo computacional, sendo a mais rápida para 25% das instâncias e apresentando, para as demais instâncias, soluções que estão dentro de um fator de $2^{2.1} \approx 4.2$ vezes o menor tempo computacional obtido. Portanto, como melhor estratégia *relax-and-fix* para o modelo FRFSMP foi escolhida RFX3, que consiste numa partição por cenário e as iterações são realizadas do cenário de menor demanda até o cenário de pior demanda. Vale ressaltar que essa estratégia foi também a melhor para o modelo FRFST apresentado no Apêndice A.

A Tabela 5.6 apresenta os valores médios da função objetivo, do tempo computacional e do gap das estratégias CPX15 (melhor estratégia CPLEX) e RFX3 (melhor estratégia *relax-and-fix*) para cada grupo de instâncias. Em relação ao valor da função objetivo, os resultados são similares, sendo ligeiramente melhores com a estratégia RFX3. O custo médio apresentou uma redução de 0,61%, enquanto o tempo computacional médio reduziu 13,73%. Para as instâncias pequenas e médias, houve uma redução significativa no tempo computacional. Para as instâncias grandes ocorreu uma pequena melhoria no valor médio da função objetivo. Os resultados da estratégia RFX3 para todas as instâncias são apresentados na Tabela E.4 no Apêndice E.



(a) Função objetivo.



(b) Tempo computacional.

Figura 5.3: Perfis de desempenho das estratégias *relax-and-fix* testadas com o modelo FRFSMP.

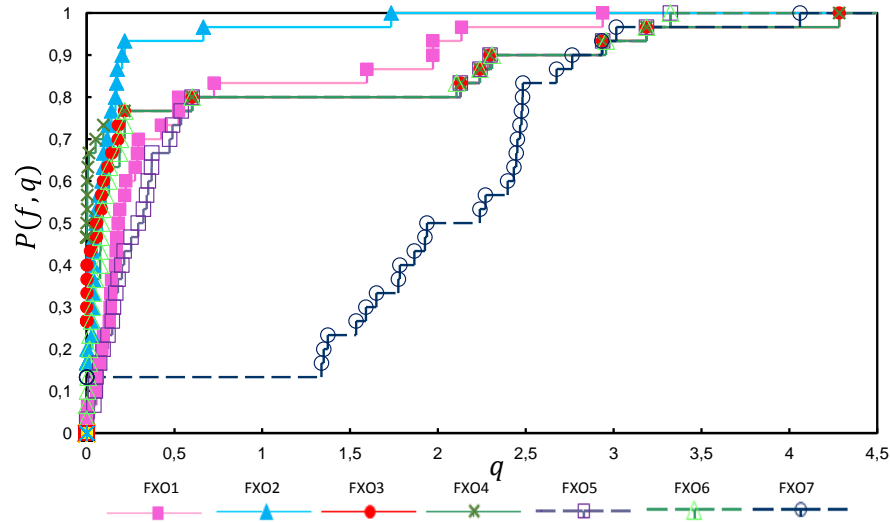
Tabela 5.6: Resultados médios das estratégias CPX15 e RFX3 para o modelo FRFSMP.

Instância	CPX15			RFX3		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (seg.)	Gap (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (seg.)	Gap (%)
Pequenas	939.101	3.245	6,772	945.492	2.785	9,110
Médias	12.167.234	1.089	0,8710	12.799.416	689,6	5,025
Grandes	3.858.121.743	3.600	94,03	3.833.782.418	3.600	94,01
Média	1.290.409.359	2.645	33,89	1.282.509.109	2.358	36,05

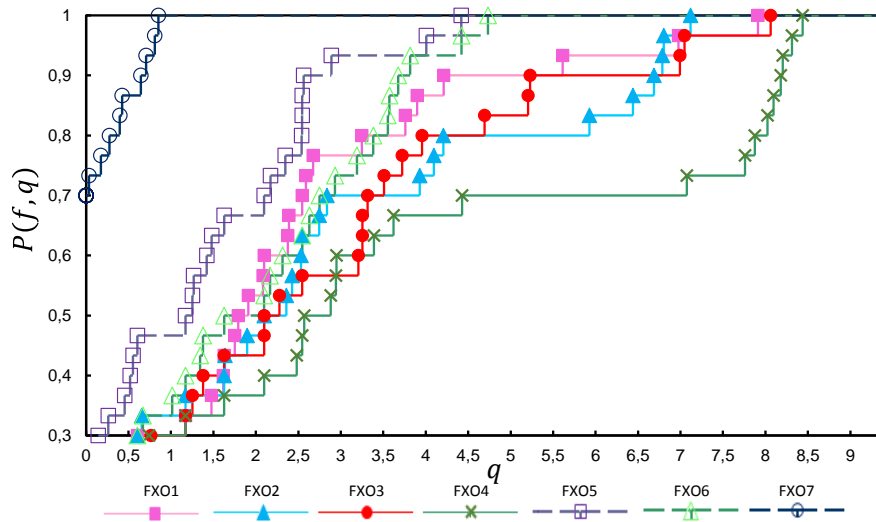
5.5.3 Resultados das heurísticas *fix-and-optimize*: modelo FRFSMP

As Figuras 5.4(a) e 5.4(b) mostram os perfis de desempenho do valor da função objetivo e do tempo computacional das estratégias *fix-and-optimize* (FXO1-FXO7) testadas com o modelo FRFSMP. A Tabela E.1 no Apêndice E mostra os valores extremos da curva de perfis de desempenho

para as estratégias *fix-and-optimize*. Como solução inicial para a estratégia *fix-and-optimize* foi utilizada a solução trivial de “zero distribuição” que consiste em não realizar atendimento da demanda nas áreas afetadas e portanto são nulas todas as variáveis relacionadas com distribuição e atendimento. Nessa solução considera-se que todos os centros de auxílio estão em operação, embora não exista distribuição de produtos.



(a) Função objetivo.



(b) Tempo computacional.

Figura 5.4: Perfis de desempenho das estratégias *fix-and-optimize* testadas com o modelo FRFSMP.

Em relação ao valor da função objetivo (Figura 5.4(a)), as melhores estratégias foram as heurísticas com partições por período (FXO1 e FXO2). Particularmente, a heurística FXO2 dominou todas as demais estratégias em valor da função objetivo e, adicionalmente, foi melhor do que as estratégias FXO1, FXO3 e FXO4 em tempo computacional (Figura 5.4(b)). Como esperado, a estratégia FXO7 foi muito mais rápida do que as demais estratégias, pois essa estratégia além

de fixar as variáveis inteiras, fixa as variáveis reais $\mathbf{P}(\xi)$, tornando cada subproblema menor. As estratégias FXO5 e FXO6 apresentaram bons resultados em tempo computacional, porém, tiveram resultados ruins em relação ao valor da função objetivo, o que também aconteceu com a estratégia FXO7. Como melhor estratégia, selecionou-se a estratégia FXO2, que resolveu 17% das instâncias com o menor valor na função objetivo e, para as demais instâncias, apresentou soluções dentro de um fator de $2^{1,73} \approx 3.3$ vezes o menor custo obtido. Vale ressaltar que essa estratégia foi também a melhor para os modelos FRFS e FRFST apresentados no Apêndice A.

A Tabela 5.7 apresenta os valores médios da função objetivo, do tempo computacional e do gap para cada grupo de instâncias resolvidas pelas estratégias RFX3 (melhor estratégia *relax-and-fix*) e FXO2 (melhor estratégia *fix-and-optimize*) para o modelo FRFSMP. Existe um ganho significativo em custo da função objetivo e tempo computacional com a estratégia FXO2 em relação a RFX3. O custo médio total passou de uma média de 1.282.509.109 com RFX3 a uma média de 627.292.016 com FXO2, uma redução de 51,09%. O tempo computacional médio diminuiu de 2.358 com RFX3 a 1.620 com FXO2, uma diminuição de 31,30%. A melhoria no custo da função objetivo observa-se apenas nas instâncias maiores, para as quais não existiu melhoria no tempo computacional. Para as instâncias pequenas e médias apenas existiu melhoria no tempo computacional médio. Os resultados da estratégia FXO2 para todas as instâncias são apresentados na Tabela E.5 no Apêndice E.

Tabela 5.7: Resultados médios das estratégias RFX3 e FXO2 para o modelo FRFSMP.

Instância	RFX3			FXO2		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (seg.)	Gap (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (seg.)	Gap (%)
Pequenas	945.492	2.785	9,110	996.721	796,6	13,83
Médias	12.799.416	689,6	5,0250	12.960.524	463,8	6,891
Grandes	3.833.782.418	3.600	94,01	1.867.918.803	3.600	93,86
Média	1.282.509.109	2.358	36,05	627.292.016	1.620	38,19

5.5.4 Resultados das heurísticas de decomposição híbridas: modelo FRFSMP

Nessa seção é apresentado o resultado da implementação da heurística de decomposição em duas fases descrita na Seção 4.4. Foram realizados testes computacionais fornecendo a solução inicial da heurística de decomposição para melhor as heurísticas *relax-and-fix* (RFX3) e *fix-and-optimize* (FXO2). Adicionalmente, foram realizados testes com a heurística FXO7, pois se esperava que essa estratégia que teve um bom desempenho em tempo computacional, fornecesse soluções melhores com uma solução inicial melhor. Não foram realizados testes com CPX1 e CPX15, pois a dificuldade destas estratégias está na obtenção de bons limitantes inferiores.

A média dos resultados da heurística de decomposição DHIS e das heurística híbridas

DHIS+RFX3, DHIS+FXO2 e DHIS+FXO7 comparadas com às estratégias CPX15, RFX3, FXO2 e FXO7 é apresentada na Tabela 5.8. Os resultados das estratégias DHIS, DHIS+RFX3, DHIS+FXO2 e DHIS+FXO7 para todas as instâncias são apresentados nas Tabelas E.3, E.4, E.5 e E.6, respectivamente (Ver Apêndice E).

Tabela 5.8: Média dos resultados do modelo FRFSMP obtidos pelas estratégias CPX15, RFX3, FXO2, FXO7, DHIS, DHIS+RFX3, DHIS+FXO2 e DHIS+FXO7.

Instância	Função objetivo (R\$)	Tempo (seg.)	Gap (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (seg.)	Gap (%)
CPX15			DHIS			
Pequenas	939.101	3.245	6,772	1.141.704	<u>0,4617</u>	55,07
Médias	12.167.234	1.089	0,8710	14.605.692	<u>10,39</u>	19,34
Grandes	3.858.121.743	3.600	94,03	267.391.887	<u>1,191</u>	47,53
Média	1.290.409.359	2.645	33,89	94.379.761	400,7	40,65
RFX3			DHIS+RFX3			
Pequenas	945.492	2.785	9,110	958.900	1.169	11,25
Médias	12.799.416	689,6	5,025	12.282.475	1.695	1,877
Grandes	3.833.782.418	3.600	94,01	264.409.651	3.600	46,55
Média	1.282.509.109	2.358	36,05	92.550.342	2.154	19,89
FXO2			DHIS+FXO2			
Pequenas	996.721	796,6	13,83	959.601	259,5	15,30
Médias	12.960.524	463,8	6,891	12.755.054	279,7	6,089
Grandes	1.867.918.803	3.600	93,86	260.040.447	3.600	46,78
Média	627.292.016	1.620	38,19	91.251.701	1.380	22,72
FXO7			DHIS+FXO7			
Pequenas	2.508.901	18,01	71,29	971.521	42,66	31,05
Médias	63.417.219	173,2	81,48	12.916.099	156,2	7,018
Grandes	3.444.259.729	2.230	91,12	252.021.188	3.488	29,76
Média	1.170.061.950	807,1	81,30	88.636.270	1.229	22,61

Melhores resultados em **gap** e tempo computacional.

Na Tabela 5.8, observa-se que a estratégia DHIS é muito mais rápida do que CPX15, RFX3 e FXO2. O tempo computacional médio da heurística DHIS é 400,7 segundos, isto é, 84,87%, 83,03% e 82,06% menor do que o tempo médio gasto com as estratégias CPX15, RFX3 e FXO2, respectivamente. Em relação ao custo da função objetivo, o custo médio com a heurística DHIS é 92,69%, 92,64% e 84,95% menor do que o custo médio com as estratégias CPX15, RFX3 e FXO2, respectivamente. Porém, a estratégia DHIS melhorou apenas o custo das instâncias grandes.

Todas as heurísticas híbridas (DHIS+RFX3, DHIS+FXO2 e DHIS+FXO7) melhoraram as soluções da heurística DHIS em relação ao valor da função objetivo. No entanto, como esperado, o tempo computacional foi maior. Com DHIS+RFX3, DHIS+FXO2 e DHIS+FXO7 a redução no custo médio foi de 1,94%, 3,31% e 6,09%, respectivamente, em relação à DHIS pura. Porém, o aumento no tempo computacional foi de mais de 100% com todas as estratégias híbridas (DHIS+RFX3, DHIS+FXO2 e DHIS+FXO7) em relação à estratégia DHIS. A vantagem da utilização das heurísticas híbridas é, basicamente, na redução do valor da função objetivo. A

melhoria das soluções das estratégias híbridas em relação às soluções da heurística DHIS dá-se, principalmente, nos custos logísticos.

É importante ressaltar que o gap das soluções encontradas é em relação ao limitante inferior, que é ruim para algumas instâncias, portanto se espera que o gap em relação à solução ótima seja menor. Para as instâncias grandes, por exemplo, não foi possível resolver a relaxação linear no tempo limite estabelecido, portanto o limitante inferior foi obtido resolvendo o modelo relaxado sem considerar as restrições de dimensionamento de frota.

Em suma, a melhor estratégia em relação a tempo computacional para todos os grupos de instâncias é a estratégia DHIS. Em relação ao gap e o valor da função objetivo a melhor estratégia é CPX15 para as instâncias pequenas e médias e FXO7+DHIS para as instâncias grandes.

Como descrito no início da Seção 5.5, o tempo computacional refere-se ao tempo total gasto pelo *solver* CPLEX para resolver os problemas/subproblemas. A medida de tempo computacional utilizada nesse trabalho desconsidera o tempo necessário para carregar o modelo e/ou as instâncias. Para as instâncias pequenas e médias, não existe uma diferença significativa entre o tempo utilizado pelo *solver* para resolver os problemas e o tempo total. Porém, para as instâncias grandes, a diferença é significativa. Na Tabela 5.9, observa-se a média do tempo total gasto pelas melhores estratégias e do tempo gasto pelo *solver* para resolver os subproblemas em cada uma dessas estratégias. O tempo total foi, em média, 216% maior do que o tempo gasto pelo *solver*, principalmente devido à influencia das instâncias grandes. Dado que o *software* GAMS gera um modelo cada vez que é necessário resolver um subproblema, é esperado que o tempo total nas estratégias heurísticas seja maior do que nas estratégias CPX1 e CPX15, nas quais o modelo deve ser gerado apenas uma vez.

Tabela 5.9: Média do tempo total e do tempo gasto pelo *solver* na resolução das instâncias do modelo FRFSMP.

	Tempo total (Seg.)	Tempo gasto pelo solver (Seg.)
CPX1	3.826	3.066
CPX15	3.404	2.645
DHIS	1.241	400,7
RFX3	7.033	2.358
FXO2	8.588	1.620
FXO7	8.085	807,1
RFX3+DHIS	5.179	2.154
FXO2+DHIS	5.075	1.380
FXO7+DHIS	7.139	1.229
Média	5.508	1.740

5.6 Desempenho das estratégias de solução: modelo FRFSDC

Nessa seção, são apresentados os resultados das melhores estratégias de solução aplicadas ao modelo FRFSDC. Dado que os modelos FRFSMP e FRFSDC possuem uma estrutura similar, foram utilizadas apenas as melhores estratégias obtidas dos experimentos computacionais descritos na seção anterior para resolver o modelo FRFSDC. Adicionalmente, foram realizados testes com a estratégia CPX1 (*default*). A média dos resultados obtidos pela estratégia CPX1 é apresentada na Tabela 5.10. A média dos resultados do modelo FRFSDC obtidos pelas estratégias CPX15, RFX3, FXO2, FXO7, DHIS, DHIS+RFX3, DHIS+FXO2 e DHIS+FXO7 é apresentada na Tabela 5.11. Para o modelo FRFSDC, apenas foram resolvidas as instâncias pequenas e médias, pois não foi possível carregar o modelo para as instâncias maiores, devido ao número de variáveis e restrições que dependem do conjunto de subperíodos (que possui 480 elementos nas instâncias grandes). Os resultados das estratégias CPLEX, RFX3, FXO2 e híbridas aplicadas para resolver as instâncias pequenas e médias do modelo FRFSDC são apresentados nas Tabelas F.1, F.2, F.3, F.4 e F.5 (Ver Apêndice F).

Tabela 5.10: Média dos resultados do modelo FRFSDC obtidos pela estratégia CPX1.

Instância	CPX1		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)
Pequenas	4.743.115.133	97,63	0,0051
Médias	1.188.380.248.052	3.600	99,65
Média	596.561.681.593	1.849	49,83

Nas Tabelas 5.10 e 5.8 observa-se que, em média, não existiu uma diferença significativa entre o resultado das estratégias CPX1 e CPX15. CPX15 melhorou apenas a média do tempo computacional das instâncias pequenas em 46,64%. Por outro lado, as estratégias heurísticas melhoraram a solução da estratégia CPX15 tanto em tempo quanto em valor da função objetivo. A média do valor da função objetivo foi 81,17%, 88,87%, 56,04% e 99,27% menor com RFX3, FXO2, FXO7 e DHIS, respectivamente, em relação à média obtida com CPX15. A média do tempo computacional aumentou 6,90% com RFX3 e diminuiu 12,54%, 77,97% e 88,17% com FXO2, FXO7 e DHIS, respectivamente, em relação à média do tempo computacional obtida com CPX15.

Similarmente ao resultado obtido no modelo FRFSMP, as estratégias híbridas melhoraram o valor da função objetivo obtido com DHIS, mas aumentaram, consideravelmente, o tempo computacional. As estratégias híbridas RFX3+DHIS, FXO2+DHIS e FXO7+DHIS melhoraram em 1,98%, 3,36% e 2,89%, respectivamente, a média do valor da função objetivo em relação a DHIS. Porém, em todas as estratégias híbridas o aumento no tempo computacional foi maior do

Tabela 5.11: Média dos resultados do modelo FRFSDC obtidos pelas estratégias CPX15, RFX3, FXO2, FXO7, DHIS, DHIS+RFX3, DHIS+FXO2 e DHIS+FXO7.

Instância	Função objetivo (R\$)	Tempo (seg.)	Gap (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (seg.)	Gap (%)
CPX15			DHIS			
Pequenas	4.768.380.744	49,09	0,066	5.083.607.889	1,861	0,7754
Médias	1.188.384.828.552	3.600	99,65	4.267.487.063	430,0	0,1270
Média	596.576.604.648	1.825	49,86	4.675.547.476	215,9	0,4512
RFX3			DHIS+RFX3			
Pequenas	4.790.893.145	302,0	0,2029	4.899.298.570	133,6	0,3718
Médias	219.864.587.085	3.600	97,91	4.266.608.488	3.357	0,0793
Média	112.327.740.115	1.951	49,06	4.582.953.529	1.745	0,2256
FXO2			DHIS+FXO2			
Pequenas	5.765.914.661	33,16	2,008	4.770.534.981	29,54	0,0702
Médias	127.032.962.745	3.158	10,28	4.266.352.212	1.587	0,0680
Média	66.399.438.703	1.596	6,147	4.518.443.597	808,2	0,0691
FXO7			DHIS+FXO7			
Pequenas	5.749.571.014	17,97	4,040	4.813.492.560	24,80	0,1734
Médias	518.745.871.389	786,0	99,32	4.266.734.898	1.157	0,0833
Média	262.247.721.201	402,0	51,68	4.540.113.729	590,9	0,1283

Melhores resultados em **gap** e tempo computacional.

que 100% em relação ao tempo gasto pela estratégia DHIS. A melhoria nas heurísticas híbridas, em relação à heurística DHIS, é nos custos logísticos, e parece pouco significativa pelo fato de que na função objetivo do modelo FRFSDC os custos de privação representam mais de 95% dos custos totais.

No modelo FRFSDC, existe uma diferença significativa entre o tempo utilizado pelo *solver* para resolver os problemas e o tempo total, mesmo para as instâncias pequenas e médias. Na Tabela 5.9 observa-se a média do tempo total gasto pelas melhores estratégias e do tempo gasto pelo *solver* para resolver os subproblemas em cada uma dessas estratégias. O tempo total foi, em média, 264% maior do que o tempo gasto pelo *solver*. Dado que o *software* GAMS gera o modelo a cada vez que é necessário resolver um subproblema, é esperado que o tempo total nas estratégias heurísticas seja maior do que nas estratégias CPX1 e CPX15, nas quais o modelo deve ser gerado apenas uma vez.

Para as instâncias grandes do modelo FRFSDC, foram obtidas soluções factíveis a partir das soluções do modelo FRFSMP, conforme o procedimento descrito no Capítulo 3. A média dos resultados obtidos e o tempo computacional médio gasto para obter as soluções do modelo FRFSDC a partir de soluções do modelo FRFSMP para as instâncias pequenas, médias e grandes são apresentados na Tabela 5.13. O tempo computacional apresentado é apenas o tempo de resolver o modelo FRFSDC com as decisões de transporte, localização e dimensionamento fixas, sem considerar o tempo computacional gasto para resolver o modelo FRFSMP. Para as instâncias grandes, foi encontrado um limitante inferior com base na diferença entre a disponibilidade

Tabela 5.12: Média do tempo total e do tempo gasto pelo *solver* na resolução das instâncias do modelo FRFSDC.

	Tempo total (Seg.)	Tempo gasto pelo solver (Seg.)
CPX1	2.348	1.849
CPX15	2.436	1.825
RFX3	4.056	1.951
FXO2	10.549	1.596
FXO7	7.250	402,0
DHIS	752,1	215,9
RFX3+DHIS	4.438	1.745
FXO2+DHIS	4.432	808,2
FXO7+DHIS	3.749	590,9
Média	4.446	1.220

de produtos e a demanda de cada cenário multiplicada pelo custo de privação máximo, i.e., $\sum_w g_w(|\Delta_w|) \cdot \sum_{\xi} \max(0, \sum_{kt} d_{wkt}(\xi) - \sum_{it} q_{wit}(\xi))$, que é um limitante inferior ruim, pois não considera nem o custo nem as restrições logísticas, porém válido porque não é possível satisfazer mais demanda do que a disponibilidade de produtos. Na Tabela F.6 no Apêndice F são apresentados os resultados para todas as instâncias. O gap médio foi 7,06%, 18,58% e 87,90% para as instâncias pequenas, médias e grandes, respectivamente. O tempo computacional médio foi 0,35, 35,66 e 445,8 segundos, para as instâncias pequenas, médias e grandes, respectivamente. Para a maioria das instâncias pequenas e médias, foram obtidos gaps menores do que 1%. Nas instâncias médias em que mais veículos são necessários (M6, M8) e/ou o custo de contratar os veículos é maior (M3, M10) foram obtidos os maiores gaps.

Tabela 5.13: Média dos resultados do modelo FRFSDC obtidos a partir de soluções do modelo FRFSMP.

Instância	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)
Pequenas	14.553.291.697	0,3544	7,062
Médias	6.175.437.746	35,36	18,58
Grandes	126.390.299.355	445,8	87,90
Média	49.039.676.266	160,5	37,85

5.7 Comparação das soluções dos modelos FRFSMP e FRFSDC

Nessa seção, é realizada a comparação entre os modelos FRFSMP e FRFSDC para todas as instâncias resolvidas. Adicionalmente, esses modelos são comparadas com a suas respectivas versões bi-objetivo (FRFSMTB e FRFSMTB), descritas na Seção 3.3.

Na Tabela 5.14, é apresentado o valor médio dos resultados dos modelos FRFSMP, FRFSDC, FRFSMTB e FRFSMTB para cada grupo de instâncias. Apresenta-se o valor médio de cada tipo de custo, o número total de veículos contratados no primeiro e segundo estágio, a quantidade de centros de auxílio abertos, a quantidade de produtos estocados, a perda total de produtos e a demanda insatisfeita média, esperada e total. Nas Tabelas G.1, G.3 e G.5 no Apêndice G podem ser observados esses valores para cada uma das instâncias pequenas, médias e grandes resolvidas.

Na Tabela 5.15 é apresentado o valor médio, desvio padrão e valor mínimo dos níveis de serviço por produto ($S(w)$), área afetada ($S(k)$) e cenário ($S(\xi)$) para cada grupo de instâncias. Além disso, é apresentado o valor médio, desvio padrão e valor mínimo do nível de serviço por área afetada e produto ($S(k, w)$). Nas Tabelas G.2, G.4 e G.6 no Apêndice G podem ser observados esses valores para cada uma das instâncias pequenas, médias e grandes resolvidas. Para as instâncias grandes são apresentados apenas os resultados dos modelos FRFSMP e FRFSDC.

Para os modelos bi-objetivo é apresentada apenas uma solução, obtida com otimização hierárquica e na qual o objetivo prioritário é o objetivo humanitário. Uma análise bi-objetivo mais completa foi realizada com o modelo preliminar FRFS, o qual possui uma estrutura de custos similar ao modelo FRFSMP (ver Seção A.5 do Apêndice A).

5.7.1 Comparação do modelo FRFSDC com o modelo FRFSMP

Em relação à função objetivo, os custos mais representativos são a penalidade por demanda insatisfeita no modelo FRFSMP, que representa mais do 70% dos custos totais na maioria das instâncias, e os custos de privação no modelo FRFSDC, que representam mais do 99% dos custos totais na maioria das instâncias. Era esperado uma maior representatividade desses custos na função objetivo, refletindo a importância do atendimento às vítimas nas operações de distribuição em situações de desastre. Os custos logísticos representam menos do 30% e 1% dos custos totais nos modelos FRFSMP e FRFSDC, respectivamente. Dentre os custos logísticos, o custo mais representativo em ambos os modelos é a contratação de veículos, o que mostra também a importância do dimensionamento da frota, principalmente no primeiro estágio.

O custo total foi maior em todas as instâncias do modelo FRFSDC, em relação ao modelo FRFSMP, devido aos altos custos de privação. Além disso, o custo logístico, comum em ambos os modelos, é em média 8,17% e 57,16% maior nas instâncias pequenas e médias do modelo

FRFSDC em respeito às mesmas instâncias do modelo FRFSMP. Esse aumento está influenciado, principalmente, pelos custos de contratação de segundo estágio, os custos de operação dos centros de auxílio e, em alguns casos, pelos custos de transporte. Em contrapartida, os custos de contratação de primeiro estágio, o custo de atendimento da demanda e o custo de manter os estoques foi em média menor no modelo FRFSDC.

A tendência no modelo FRFSDC é estocar poucos produtos para diminuir a perda dos mesmos nos estoques, pois parte dos produtos estocados ficam inutilizáveis. Como consequência, mais produtos são transportados apenas nos períodos em que devem ser entregues para as áreas afetadas, aumentando o número de veículos que devem ser utilizados nos períodos de alta demanda (picos de demanda). É nesses períodos, principalmente, que é percebido um aumento no número de veículos contratados no segundo estágio (lembrando que os veículos no segundo estágio são contratados por período) para os cenários de maior demanda, em relação aos veículos contratados no modelo FRFSMP. No modelo FRFSDC há também uma tendência em se atrasar menos produtos por período. Portanto, para o modelo FRFSDC, é melhor abrir mais centros de auxílio na tentativa de aumentar a capacidade de atendimento, mesmo que em alguns períodos os centros possuam capacidade ociosa, do que postergar parte do atendimento para períodos futuros.

O custo de transporte pode aumentar ou não no modelo FRFSDC em relação ao modelo FRFSMP dependendo da localização dos centros de auxílio. Por um lado, no modelo FRFSDC mais centros de auxílio são abertos, o que gera mais possíveis rotas para a distribuição de suprimentos e contribui para diminuir os custos e tempos de transporte. Por outro lado, no modelo FRFSDC os centros de auxílio abertos podem estar localizados mais perto das áreas afetadas, que não é necessariamente mais perto dos depósitos, o que pode levar ao aumento dos custos e tempos de transporte. Centros de auxílio mais próximos das áreas afetadas levam a uma diminuição nos custos de atendimento da demanda no modelo FRFSDC.

A demanda total insatisfeita foi 2,41% e 33,81% menor nas instâncias pequenas e médias do modelo FRFSDC, respectivamente, em relação ao modelo FRFSMP. Note que o modelo FRFSDC diminui a demanda total insatisfeita até mesmo do modelo bi-objetivo FRFSMTB, que prioriza o atendimento da demanda.

Dado que, para as instâncias grandes, a solução do modelo FRFSDC foi obtida fixando as decisões de transporte, dimensionamento da frota e localização do modelo FRFSMP, a maioria dos custos são iguais, diferenciando-se apenas pelos custos de atendimento e a penalidade por demanda insatisfeita.

Em relação aos níveis de serviço, foi observada uma melhoria nos níveis de serviço por

cenário, por produto e por área afetada com o modelo FRFSDC, embora o custo de privação influencie principalmente o nível de serviço por área afetada ($S(k)$) e o nível de serviço por área afetada e produto ($S(k, w)$). O valor médio desses níveis de serviço é similar em ambos os modelos, FRFSMP e FRFSDC. O desvio padrão do nível de serviço $S(k)$ é em média 3,39% e 45,51% menor nas instâncias pequenas e médias do modelo FRFSDC, respectivamente. O desvio padrão do nível de serviço $S(k, w)$ é em média 15,93% e 39,86% menor nas instâncias pequenas e médias do modelo FRFSDC, respectivamente. Em média, o pior nível $S(k)$ melhorou 0,38% nas instâncias pequenas do modelo FRFSDC e 2,45% nas instâncias médias do modelo FRFSDC. Adicionalmente, em média, o pior nível $S(k, w)$ melhorou 23,76% nas instâncias pequenas do modelo FRFSDC e 6,45% nas instâncias médias do modelo FRFSDC. Essas melhorias indicam que o modelo FRFSDC realiza um atendimento mais justo/equitativo nas diferentes áreas afetadas do que o modelo FRFSMP. Note na Tabela 5.15 que nos modelos bi-objetivo também existe uma melhoria nos níveis de serviço do modelo FRFSDCB em relação ao modelo FRFSMTB.

Para as instâncias grandes do modelo FRFSDC são observadas melhorias no desvio padrão dos níveis de serviço $S(k)$ e $S(k, w)$, mesmo com as decisões de transporte, localização e dimensionamento subordinadas ao modelo FRFSMP. O desvio padrão dos níveis de serviço $S(k)$ e $S(k, w)$ foi em média 61,34% e 4,19% menor respectivamente nas instâncias grandes do modelo FRFSDC, em relação ao modelo FRFSMP.

5.7.2 Comparação dos modelos bi-objetivo com os modelos mono-objetivo

Para as instâncias pequenas e médias o valor médio do custo total dos modelos bi-objetivo é maior do que nos respectivos modelos mono-objetivo, devido a um aumento nos custos logísticos. A média da penalidade por demanda insatisfeita, por outro lado, foi menor nos modelos bi-objetivo. Essas diferenças são pouco significativas (em média menores do que 1%) nas instâncias pequenas de ambos os modelos. Para as instâncias médias, a média do custo total foi 54,93% e 0,008% maior nos modelo FRFSMTB e FRFSDCB do que nos modelos FRFSMP e FRFSDC, respectivamente. O custo logístico médio aumento em 372% e 437% com os modelos FRFSMTB e FRFSDCB, enquanto que a penalidade por demanda insatisfeita diminui apenas 3,11% e 0,22% com os modelos FRFSMTB e FRFSDC, em relação aos modelos FRFSMP e FRFSDC, respectivamente. A maior diferença foi nas instâncias M1, M3, M5, M6 e M10.

O aumento nos custos logísticos totais é influenciado principalmente pelo custo de contratação de veículos, o custo de transporte e o custo de operação dos centros de auxílio. O número de veículos contratados foi maior ou igual em todas as instâncias nas versões bi-objetivo dos modelos, enquanto que o número de produtos estocados foi menor ou igual na maioria das instâncias.

O número de centros de auxílio abertos aumentou na maioria das instâncias com os modelos bi-objetivo em relação aos respectivos modelos mono-objetivo.

O comportamento do custo de atendimento foi diferente em ambos os modelos. No modelo FRFSMTB, o custo de atendimento para a maioria das instâncias diminuiu, em relação ao modelo FRFSMP. No modelo FRFSDCB, o custo de atendimento aumentou para a maioria das instâncias, em relação ao modelo FRFSDC. Por um lado, no modelo mono-objetivo FRFSMP, os centros de auxílio são localizados mais perto dos depósitos, com a finalidade de reduzir o custo e tempo de transporte dos veículos, enquanto que no modelo bi-objetivo FRFSMTB são mais os centros de auxílio abertos, a maioria localizados mais perto das áreas afetadas, diminuindo o custo de atendimento. Por outro lado, no modelo mono-objetivo FRFSDC já existe uma tendência a localizar mais centros de auxílio do que no modelo mono-objetivo FRFSMP, pois em geral os custo de atendimento são relativamente baixos. Assim, o custo de atendimento no modelo bi-objetivo FRFSDCB não diminuiu, em relação ao modelo FRFSDC, porque já é baixo no modelo FRFSDC e, além disso, aumenta no modelo FRFSDCB porque não é levado em conta na otimização do objetivo prioritário de diminuição do custo de privação.

A demanda total insatisfeita foi menor nos modelos bi-objetivo, em relação aos respectivos modelos mono-objetivo, principalmente nas instâncias médias. Nas instâncias médias, a demanda total insatisfeita foi, em média, 33,54% e 0,11% menor nos modelos FRFSMTB e FRFSDCB do que nos respectivos modelos mono-objetivo, FRFSMP e FRFSDC.

Nas instâncias S7 e M5 o custo total do modelo FRFSDCB foi maior do que o custo total do modelo FRFSDC. De forma similar, o custo total do modelo FRFSMTB foi menor nas instâncias M4 e M7, em relação ao modelo FRFSMP. Isso é devido ao fato dos modelos não serem resolvidos até otimalidade, mas com um gap de 1%.

Tabela 5.14: Valor médio dos resultados dos modelos FRFSMP, FRFSDC, FRFSMTB e FRFSDCB para cada grupo de instâncias.

Instâncias	Modelo	Custo total	Custo oper.	Custo de contratação		Custo transp.	Custo estoque	Custo atend.	Penalidade demanda insat.	Veículos contratados		Centros abertos	Estoque	Perda de prod.	Demanda insatisfeita		
				1 ^o estág.	2 ^o estág.					1 ^o estág.	2 ^o estág.				Média	Esperada	Total
Pequenas	FRFSMP	938.591	4.810	31.560	185.691	30.149	676	4.661	681.044	14	37	2	4.594	1.223	2.612	2.613	33.910
	FRFSDC	4.743.000.848	8.430	32.052	203.433	30.445	633	3.597	4.742.722.258	14	41	3	1.654	368	2.549	2.550	33.093
	FRFSMTB	945.947	4.640	32.872	194.269	30.876	1.215	4.613	677.461	15	39	2	3.203	755	2.581	2.582	33.501
	FRFSDCB	4.743.001.268	8.070	32.872	203.231	30.509	633	3.697	4.742.722.256	15	41	4	1.654	368	2.549	2.550	33.093
Médias	FRFSMP	12.224.369	59.160	1.578.248	57.017	47.518	23.090	130.504	10.328.832	174	17	10	105.785	23.620	3.835	3.263	28.964
	FRFSDC	4.287.293.502	80.280	1.418.650	1.275.227	100.664	5.780	98.595	4.284.314.304	130	308	13	15.288	3.312	1.889	1.767	19.172
	FRFSMTB	19.003.070	82.580	4.786.453	3.915.590	88.762	14.416	68.169	10.047.100	217	207	14	75.840	17.448	1.892	1.770	19.248
	FRFSDCB	4.290.877.950	86.800	3.045.586	11.955.834	715.833	5.456	208.567	4.274.859.873	155	564	14	16.926	3.520	1.884	1.762	19.150
Grandes	FRFSMP	248.254.804	353.700	1.038.230	37.557.684	1.835.941	48.756	175.743	207.244.750	112	5.230	29	311.121	80.823	137.059	106.151	710.798
	FRFSDC	17.574.556.407	353.700	2.595.600	37.557.684	1.371.862	48.756	177.472	17.532.451.332	137	5.230	29	311.121	80.823	137.059	106.151	710.798

Tabela 5.15: Valor médio, desvio padrão e pior nível de serviço por produto ($S(w)$), área afetada ($S(k)$) e cenário ($S(\xi)$) para cada grupo de instâncias.

Instâncias	Modelo	$S(w)$			$S(k)$			$S(\xi)$					
		Média	Desvio	Mínimo	Média	Desvio	Mínimo	Média	Desvio	Mínimo			
Pequenas	FRFSMP	96,46	4,528	90,11	97,60	1,7431	94,66	98,08	1,926	94,18	94,49	14,22	48,54
	FRFSDC	96,47	4,504	90,17	98,20	1,6841	95,02	98,09	1,911	94,23	94,49	11,95	60,07
	FRFSMTB	96,46	4,516	90,14	97,36	1,8585	94,76	98,08	1,922	94,19	94,40	14,38	48,67
	FRFSDCB	96,47	4,504	90,17	98,20	1,6938	94,99	98,09	1,911	94,23	94,47	12,15	59,44
Médias	FRFSMP	99,60	0,2576	99,10	98,65	1,965	95,06	98,93	0,9407	97,52	98,90	2,542	88,23
	FRFSDC	99,71	0,0836	99,54	99,30	1,071	97,39	98,94	1,0121	97,32	99,23	1,529	93,91
	FRFSMTB	99,71	0,0836	99,54	99,42	0,7818	98,16	99,01	0,9393	97,52	99,25	1,240	95,62
	FRFSDCB	99,71	0,0835	99,54	99,50	0,7346	98,12	99,01	0,9393	97,52	99,37	1,105	95,79
Grandes	FRFSMP	94,37	4,1802	89,84	90,72	1,0214	88,92	95,08	5,983	85,85	93,96	5,118	86,18
	FRFSDC	94,37	4,1802	89,84	88,79	0,3949	87,89	95,08	5,983	85,85	93,30	4,903	86,55

5.8 Análise de EVPI e VSS

Nessa seção, são analisados o EVPI (*Expected Value of Perfect Information*) e VSS (*Value of the Stochastic Solution*) (KALL; WALLACE, 1994; BIRGE; LOUVEAUX, 1997), duas medidas comumente utilizadas para avaliar o valor do modelo de programação estocástica com recursos (RP) em relação a usar versões aproximadas mais simples e, na maioria das vezes, mais fáceis de serem resolvidas.

EVPI é a diferença entre o valor do problema RP e o valor do problema WS (*wait-and-see*), i.e., $EVPI = RP - WS$. Basicamente, o problema WS consiste na resolução dos problemas sob a suposição de informação perfeita. Isto é possível resolvendo-se o problema determinístico associado a cada um dos " ξ " cenários. O valor da solução WS é, então, o valor esperado das soluções de cada cenário resolvido independentemente, i.e., $WS = \sum_{\xi} \pi(\xi) \cdot WS(\xi)$, em que $WS(\xi)$ é o valor do problema determinístico associado ao cenário ξ . Valores suficientemente pequenos do EVPI indicam que a aleatoriedade não tem um impacto grande no problema estocástico e, por essa razão, é suficiente aproximá-lo pelo problema WS.

VSS é a diferença entre o valor do problema EEV e o valor do problema RP, i.e., $VSS = EEV - RP$. O problema EEV é uma versão do problema RP em que as variáveis de primeiro estágio são fixadas de acordo com a solução do problema determinístico associado a um cenário de referência. Como cenário de referência é comum usar o valor esperado dos parâmetros estocásticos e/ou o valor dos parâmetros do cenário de pior caso. Nesse trabalho, assim como em Döyen, Aras e Barbarosoglu (2011), não é apropriado usar o valor esperado das variáveis aleatórias como cenário de referência, pois é subestimado o número de veículos e os centros de auxílio necessários para realizar a distribuição de produtos nos cenários de maior demanda, gerando atrasos altos e, conseqüentemente, custos extremamente altos devido à penalidade pela demanda insatisfeita. Para algumas instâncias pequenas do modelo FRFSMP, por exemplo, o VSS encontrado com base no cenário de valor esperado é até 2.200% maior que o valor do problema RP. Portanto é utilizado como cenário de referência o cenário de pior caso (*WC worst-case-scenario*). O VSS mede o benefício ou ganho de resolver o problema estocásticos com recurso (RP) em relação à simplesmente resolver um problema determinístico aproximando as variáveis aleatórias de acordo com um determinado cenário de referência.

Na Tabela 5.16 é apresentado o valor médio do EVPI e VSS para cada grupo de instâncias do modelo FRFSMP. Os valores do EVPI para cada uma das instâncias podem ser observados na Tabela E.7 no Apêndice E. Note que, em média, os valores de EVPI e VSS para o modelo FRFSMP são relativamente altos, o que mostra a importância da consideração das incertezas e o alto custo de considerar como cenário de referência o cenário de pior caso.

Tabela 5.16: Média dos resultados EVPI e VSS para o modelo FRFSMP.

Instância	WS	RP	EEV	EVPI		VSS	
				Valor	% ¹	Valor	% ²
Pequenas	912.585	938.591	948.175	26.006	3,935	9.585	5,692
Médias	11.001.411	12.265.369	18.488.940	1.263.959	14,69	6.223.571	185,0
Grandes	244.592.541	248.254.804	267.905.892	3.662.264	15,84	19.651.088	261,2
Média	85.502.179	87.152.921	95.781.002	1.650.743	11,49	8.628.081	150,6

¹ %=EVPI/RP

² %=VSS/RP

No problema WS do modelo FRFSMP foi observado para a maioria das instâncias que são necessários menos veículos contratados e os centros de auxílio abertos nas soluções dos problemas determinísticos dos cenários de baixa demanda do que os veículos contratados e centros abertos no primeiro estágio do problema RP. Portanto, para esses cenários de menor demanda, há uma diminuição dos custos logísticos enquanto que os níveis de serviço foram similares aos obtidos pelo problema RP. Para os cenários de maior demanda, em contrapartida, são contratados mais veículos e abertos mais centros de auxílio no problema WS do que no problema RP, o que leva a um aumento dos custos logísticos em troca de melhorar os níveis de serviço desses cenários. No problema EEV, dado que são fixadas as decisões de primeiro estágio com base no cenário de pior caso (maior demanda), existe um ligeiro aumento nos níveis de serviço de alguns cenários, pois os veículos contratados e os centros de auxílio abertos para o cenário de maior demanda são suficientes para a distribuição de produtos em qualquer um dos cenários. Porém, contratar veículos e abrir centros de auxílio com base no cenário de pior caso produz custos logísticos bastante altos.

Nas instâncias com maior disponibilidade de produtos (M2, L2) o valor do percentual EVPI/RP e VSS/RP é maior, pois nessas instâncias o custo por demanda insatisfeita é baixo e a contratação de veículos do primeiro estágio tem uma influência maior nos custos da função objetivo. Por outro lado, para as instâncias com um baixo número de veículos disponíveis no primeiro estágio (M3, L3), as decisões de contratação estão limitadas a essa disponibilidade de veículos, o que leva a soluções semelhantes nos problemas WS, RP e EEV. Portanto, o percentual EVPI/RP e VSS/RP nessas instâncias é relativamente baixo. Nas instâncias com redução da capacidade dos centros de auxílio (M5, L5) e aumento dos custos dos mesmos (M7, L7), não foi percebida uma diferença significativa dos valores do EVPI e VSS, em relação aos casos originais (M1, L1), devido principalmente ao baixo impacto dos custos de operação dos centros de auxílio no valor da função objetivo. Quando a capacidade dos veículos é diminuída (M6, L6) ou o tempo de transporte aumenta (M8, L8), observa-se um aumento no valor EVPI, em relação aos casos originais (M1, L1), o que indica que nas instâncias com restrições nos veículos (de disponibilidade,

tempo ou capacidade) o impacto das incertezas é maior. Comportamento análogo é observado nas instâncias M9 e L9 que possuem um suprimento menor. As instâncias nas que se reduzem tanto os produtos quanto os suprimentos (M9, L9) sofrem também um maior impacto das incertezas, pois possuem um valor significativamente maior de EVPI em relação aos casos originais (M1, L1). Finalmente, nas instâncias com aumento nos custos de contratação de segundos estágio (M10, L10), não há uma diferença significativa nos valores EVPI e VSS em relação aos casos originais (M1, L1).

Na Tabela 5.17 é apresentado o valor médio do EVPI e VSS para cada grupo de instâncias do modelo FRFSDC. Os valores do EVPI para cada uma das instâncias podem ser observados na Tabela F.7 no Apêndice F. Observe que para o conjunto de instâncias testadas o valor do EVPI e VSS não parece representativo, pois é em média 0,0924% e 0,6276% o valor do problema RP. Isso acontece porque tanto no problema RP, quanto nos problemas WS e EEV o custo de privação representa mais do 99% do custo total da função objetivo. Um resultado similar nos três problemas (WS, RP, EEV) indica que todas as abordagens conseguem satisfazer uma quantidade similar de demanda. Portanto, a diferença entre os problemas WS, RP e EEV é principalmente nos custos logísticos. De fato, em algumas instâncias, é apenas nos custos logísticos. Sendo assim, para o modelo FRFSDC é mais justo comparar o EVPI e VSS em relação aos custos logísticos e não ao custo total, como mostrado na Tabela 5.18. O comportamento dos valores EVPI e VSS foi similar aos do modelo FRFSMP, sendo maior o impacto das incertezas nas instâncias médias nas quais é modificada a capacidade, disponibilidade ou tempo de transporte dos veículos (M3, M6, M8). Nessas instâncias, junto com as instâncias S8, M2, M4 e M9, foram percebidas ligeiras melhorias no atendimento da demanda do problema WS. Particularmente, resolver o problema EEV com base no cenário de pior caso para a instância S8 resultou em custos extremamente altos, pois devido ao aumento no tempo de transporte muitos mais veículos são contratados no problema WCS dessa instância.

Tabela 5.17: Média dos resultados EVPI e VSS para o modelo FRFSDC.

Instância	WS	RP	EEV	EVPI		VSS	
				Valor	% ¹	Valor	% ²
Pequenas	4.742.972.500	4.743.000.848	4.750.417.770	28.348	0,0005	7.416.922	0,7566
Médias	4.264.802.864	4.287.293.502	4.313.205.555	22.490.637	0,1844	25.912.053	0,4985
Média	4.503.887.682	4.515.147.175	4.531.811.662	11.259.493	0,0924	16.664.488	0,6276

¹ %=EVPI/RP

² %=VSS/RP

Tabela 5.18: Valores EVPI e VSS do modelo FRFSDC comparados com os custos logísticos.

Instância	Custos logístico	EVPI		VSS	
		Valor	% ¹	Valor	% ²
S1	11.959	2.040	17,06	33.265	2,782
S2	10.154	1.499	14,76	33.602	3,309
S3	11.959	1.487	12,43	34.093	2,851
S4	2.640.125	250.988	9,507	11.052.561	4,186
S5	11.965	817	6,824	34.360	2,872
S6	12.137	1.707	14,07	14.686	1,210
S7	17.359	2.232	12,86	33.896	1,953
S8	12.020	20.269	168,6	62.665.854	5.213,4
S9	10.290	440,6	4,282	25.624	2,490
S10	11.959	2.002	16,74	241.278	20,18
M1	2.019.573	406.993	20,15	7.485.639	3,707
M2	447.346	939.186	209,9	8.669.727	19,38
M3	2.392.621	9.583.727	400,6	402.488	0,1682
M4	13.292.248	205.656.302	1.547	201.762.963	15,18
M5	2.011.782	334.119	16,61	7.391.911	3,674
M6	2.494.345	5.316.090	213,1	2.436.703	0,9769
M7	1.983.072	339.249	17,11	7.297.325	3,680
M8	2.932.691	1.031.995	35,19	6.719.678	2,291
M9	385.858	908.802	235,5	8.257.557	21,40
M10	846.483	389.913	46,06	8.696.544	10,27
Média	1.577.797	11.259.493	150,9	16.664.488	266,8

¹ %=EVPI/(custos logísticos)

² %=VSS/(custos logísticos)

Capítulo 6

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesse trabalho, foram desenvolvidos dois modelos de programação estocástica inteira-mista para o problema integrado de localização de centros de auxílio e distribuição de suprimentos em operações de resposta a desastres. Diferentemente da maioria dos trabalhos da literatura, os modelos propostos nesse trabalho integram a localização-distribuição e o dimensionamento de frota heterogênea para contextos multi-períodos, multi-produtos e com considerações de custos de contratação, reaproveitamento de veículos e tempo de transporte. Além disso, os modelos também consideram as incertezas inerentes de demanda, disponibilidade de suprimentos, disponibilidade das rotas e proporção de estoque utilizável via um conjunto discreto de cenários, que foi construído com base em dados históricos de enchentes e deslizamento do estado do Rio de Janeiro de 1966 a 2013. Num dos modelos, ainda são considerados custos sociais, representados por custos de privação que permitem considerar o tempo que as vítimas permanecem sem atendimento. Os modelos foram testados com inspiração no megadesastre da região Serrana do Rio de Janeiro de 2011, que é considerado o pior desastre brasileiro em número de vítimas fatais. As soluções do modelo que considera custos sociais é mais equitativa na distribuição de produtos entre as diferentes áreas afetadas, evitando que áreas afastadas tenham níveis de serviço muito baixos em relação às demais áreas. Entretanto, o problema com custos de privação é muito mais difícil de ser resolvido. Para resolver instâncias de grande porte, foram exploradas diversas estratégias do algoritmo *branch-and-cut* do *solver* comercial CPLEX 12.5.1, heurísticas *relax-and-fix*, *fix-and-optimize* e uma heurísticas de decomposição em duas fases. Os resultados mostraram que, em geral, a proibição da geração de planos de corte, o aumento da frequência de utilização da heurística RINS e a ênfase do método em factibilidade melhoram o desempenho do *branch-and-cut* do *solver*. Entretanto, algumas instâncias ainda apresentam gaps elevados

após o tempo limite de resolução. Observou-se que as heurísticas *relax-and-fix* beneficiam-se da decomposição por cenários, enquanto as heurísticas *fix-and-optimize* parecem ser mais eficientes com partição por períodos. A heurística de decomposição em duas fases mostrou-se eficiente na maioria das instâncias, fornecendo boas soluções iniciais, as quais foram utilizadas para melhorar as estratégias heurísticas *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*.

Uma extensão natural desse trabalho é o desenvolvimento de métodos de solução mais eficientes para resolver as instâncias de grande porte de ambos os modelos. Além disso, acredita-se que em futuras pesquisas pode ser melhorada a formulação matemática utilizada para a consideração dos custos sociais. A inclusão de outras características no problema, como transporte de feridos das áreas afetadas, atendimento a mais de um centro de auxílio por viagem, veículos saindo e voltando de depósitos diferentes podem ser também consideradas no futuro. A extensão para modelos multiestágios também é uma perspectiva interessante de trabalho futuro, mais é de se esperar que os modelos matemáticos tornem-se mais intratáveis, o que motiva o desenvolvimento de métodos de solução especializados.

Referências Bibliográficas

- ADRC. *GLIDENumber Initiative*. 2014. Acessado em 01/06/2014. Disponível em: <<http://www.glide-number.net/glide/public/search/search.jsp>>.
- AERODINAMICA. *Características Esquilo AS 350 B2*. 2013. Acessado em 01/06/2014. Disponível em: <<http://www.aerodinamica.com.br/PORTUGUES/as350bspec.html>>.
- AFSHAR, A.; HAGHANI, A. Modeling integrated supply chain logistics in real-time large-scale disaster relief operations. *Socio-Economic Planning Sciences*, Elsevier Ltd, v. 46, n. 4, p. 327–338, dez. 2012. ISSN 00380121. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038012111000644>>.
- AHMADI, M.; SEIFI, A.; TOOTOONI, B. A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time : A case study on San Francisco district. *Transportation Research Part E*, v. 75, p. 145–163, 2015.
- ALBAREDA-SAMBOLA, M. et al. Fix-and-relax-coordination for a multi-period location-allocation problem under uncertainty. *Computers & Operations Research*, v. 40(12), p. 2878–2892, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054813001779>>.
- ALEM, D.; CLARK, A. Stochastic Network Models for Preparedness and Response in Disaster Relief. *Submetido para revisão*, 2014.
- ALTAY, N.; GREEN, W. G. OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, v. 175, n. 1, p. 475–493, nov. 2006. ISSN 03772217. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221705005047>>.
- ANANDALINGAM, G.; FRIESZ, T. L. Hierarchical optimization: An introduction. *Annals of Operations Research*, v. 34, n. 1, p. 1–11, 1992. ISSN 02545330.
- ANAYA-ARENAS, A. M.; RENAUD, J.; RUIZ, A. Relief distribution networks: a systematic review. *Annals of Operations Research*, v. 223, n. 1, p. 53–79, abr. 2014. ISSN 0254-5330. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10479-014-1581-y>>.
- BALCIK, B.; BEAMON, B.; SMILOWITZ, K. Last mile distribution in humanitarian relief. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, v. 12, n. 2, p. 51–63, abr. 2008. ISSN 1547-2450. Disponível em: <<http://www.informaworld.com/openurl?genre=article&doi=10.1080/15472450802023329&magic=crossref||D404A21C5BB053405B1A640AFFD44AE3>>.
- BALCIK, B.; BEAMON, B. M. Facility location in humanitarian relief. *International Journal of Logistics Research and Applications*, v. 11, n. 2, p. 101–121, jan. 2008. ISSN 1367-5567. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13675560701561789>>.
- BARBAROSOGLU, G.; ARDA, Y. A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response. *Journal of the Operational Research Society*, v. 55, n. 1, p. 43–53, jan. 2004. ISSN 0160-5682. Disponível em: <<http://www.palgrave-journals.com/doi/finder/10.1057/palgrave.jors.2601652>>.

- BARBAROSOGLU, G.; ÖZDAMAR, L.; ÇEVIK, A. An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations. *European Journal of Operational Research*, v. 140, n. 1, p. 118–133, jul. 2002. ISSN 03772217. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221701002223>>.
- BATAGLIN, L.; ALEM, D. O problema de localização-distribuição no megadesastre da região Serrana no Rio De Janeiro. *Gestão & Produção*, v. 21, n. 4, p. 865–881, 2014.
- BERALDI, P. et al. Scenario-based planning for lot-sizing and scheduling with uncertain processing times. *International Journal of Production Economics*, v. 101, p. 140–149, 2006.
- BERKOUNE, D. et al. Transportation in disaster response operations. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 46, n. 1, p. 23–32, mar. 2012. ISSN 00380121. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038012111000309>>.
- BIRGE, J. R.; LOUVEAUX, F. *Introduction to Stochastic Programming*. New York: Springer, 1997. 273 p. ISBN 978-0-387-22618-7.
- BOZORGI-AMIRI, A.; JABALAMELI, M.; AL-E-HASHEM, S. M. A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty. *OR Spectrum*, v. 35, n. 4, p. 905–933, 2013. ISSN 0171-6468. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00291-011-0268-x>>.
- BOZORGI-AMIRI, A. et al. A modified particle swarm optimization for disaster relief logistics under uncertain environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 60, n. 1-4, p. 357–371, set. 2011. ISSN 0268-3768. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-011-3596-8>>.
- BRUNETTA, L.; CONFORTI, M.; FISCHETTI, M. A polyhedral approach to an integer multicommodity flow problem. *Discrete Applied Mathematics*, v. 101, p. 13–36, 2000.
- BUSCH, A.; AMORIM, S. A tragédia da região serrana do Rio de Janeiro em 2011 : procurando respostas. *Coordenação Geral de Pesquisa da Escola Nacional de Administração Pública (ENAP)*, v. 1, p. 1–20, 2011.
- CAMACHO-VALLEJO, J. F. et al. A bi-level optimization model for aid distribution after the occurrence of a disaster. *Journal of Cleaner Production*, set. 2014. ISSN 09596526. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614010087>>.
- CAVALCANTI, L. B. a. et al. Critérios de desempenho para distribuição de suprimentos em ações humanitárias. *XLVI Simpósio Brasileiro De Pesquisa Operacional*, 2014.
- CHANG, M.-S.; TSENG, Y.-L.; CHEN, J.-W. A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 43, n. 6, p. 737–754, nov. 2007. ISSN 13665545. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1366554507000178>>.
- CLARK, A.; CULKIN, B. A network transshipment model for planning humanitarian relief operations after a natural disaster. In: VITORIANO, B. n.; MONTERO, J.; RUAN, D. (Ed.). *Decision aid models for disaster management and emergencies*. Paris: Atlantis Press, 2013, (Atlantis Computational Intelligence Systems, v. 7). p. 233–257. ISBN 978-94-91216-73-2. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.2991/978-94-91216-74-9>>.
- CONFAZ. *Diário oficial da união Seção 1*. 2014. Acessado em 01/06/2014. Disponível em: <<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=14&data=24/01/2014>>.

- DANNA, E.; ROTHBERG, E.; PAPE, C. L. Exploring relaxation induced neighborhoods to improve MIP solutions. *Mathematical Programming*, v. 102, n. 1, p. 71–90, 2005. ISSN 00255610.
- DARTMOUTH. *Global Active Archive of Large Flood Events*. 2014. Acessado em 01/06/2014. Disponível em: <<http://www.dartmouth.edu/~floods/Archives/>>.
- DAVIS, L. B. et al. Inventory planning and coordination in disaster relief efforts. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 141, n. 2, p. 561–573, fev. 2013. ISSN 09255273. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925527312004082>>.
- DE ANGELIS, V. et al. Multiperiod integrated routing and scheduling of World Food Programme cargo planes in Angola. *Computers & Operations Research*, v. 34, n. 6, p. 1601–1615, jun. 2007. ISSN 03050548. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030505480500239X>>.
- DOLAN, E. D.; MORÉ, J. J. Benchmarking optimization software with performance. *Math. Program.*, v. 213, p. 201–213, 2002.
- DURAN, S.; GUTIERREZ, M. A.; KESKINOCAK, P. Pre-Positioning of Emergency Items for CARE International. *Interfaces*, v. 41, n. 3, p. 223–237, jun. 2011. ISSN 0092-2102. Disponível em: <<http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/inte.1100.0526>>.
- DÖYEN, A.; ARAS, N.; BARBAROSOGLU, G. A two-echelon stochastic facility location model for humanitarian relief logistics. *Optimization Letters*, v. 6, n. 6, p. 1123–1145, nov. 2011. ISSN 1862-4472. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11590-011-0421-0>>.
- EFRON, B. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, v. 7, n. 1, p. 1–26, 1979.
- EM-DAT. *The International Disaster Database*. 2015. Acessado em 01/06/2014. Disponível em: <http://www.emdat.be/advanced_search/index.html>.
- ESCUADERO, L. F. et al. BFC-MSMIP: an exact Branch-and-Fix coordination approach for solving multistage stochastic mixed 0-1 problems. *TOP*, v. 17, n. 1, p. 96–122, 2009.
- ESHGHI, K.; LARSON, R. C. Disasters: lessons from the past 105 years. *Disaster Prevention and Management*, v. 17, n. 1, p. 62–82, 2008. ISSN 0965-3562. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/10.1108/09653560810855883>>.
- FAN, Y.; LIU, C. Solving stochastic transportation network protection problems using the progressive hedging-based method. *Networks and Spatial Economics*, v. 10, n. 2, p. 193–208, mar. 2008. ISSN 1566-113X. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11067-008-9062-y>>.
- FERREIRA, D.; MORABITO, R.; RANGEL, S. Relax and fix heuristics to solve one-stage one-machine lot-scheduling models for small-scale soft drink plants. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 37, n. 4, p. 684–691, abr. 2010. ISSN 03050548. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305054809001695>>.
- FISCHETTI, M.; LODI, A. Local branching. *Mathematical Programming*, Springer-Verlag, v. 98, n. 1-3, p. 23–47, 2003. ISSN 0025-5610. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10107-003-0395-5>>.
- FURLAN, M. M. *Métodos heurísticos para o problema de dimensionamento de lotes multiestágio com limitação de capacidade*. 137 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2011.

- GALINDO, G.; BATTA, R. Prepositioning of supplies in preparation for a hurricane under potential destruction of prepositioned supplies. *Socio-Economic Planning Sciences*, Elsevier Ltd, v. 47, n. 1, p. 20–37, mar. 2013. ISSN 00380121. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038012112000596>>.
- GALINDO, G.; BATTA, R. Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, Elsevier B.V., v. 230, n. 2, p. 201–211, out. 2013. ISSN 03772217. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221713000866>>.
- GERA. *Tabelas de fretes*. 2014. Acessado em 01/06/2014. Disponível em: <http://www.guiadotrc.com.br/truckinfo/gestao_open.asp>.
- GUIADOTRC. *Tipo de caminhos (Tamanhos e capacidades)*. 2013. Acessado em 01/06/2014. Disponível em: <http://www.guiadotrc.com.br/guiadotransportador/tipos_caminhao.asp>.
- HAIMES, Y.; LASDON, L.; WISMER, D. On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, SMC-1, n. 3, p. 296–297, July 1971. ISSN 0018-9472.
- HELBER, S.; SAHLING, F. A fix-and-optimize approach for the multi-level capacitated lot sizing problem. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 123, n. 2, p. 247–256, fev. 2010. ISSN 09255273. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925527309003107>>.
- HOLGUÍN-VERAS, J. et al. On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models. *Journal of Operations Management*, Elsevier B.V., v. 31, n. 5, p. 262–280, jul. 2013. ISSN 02726963. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272696313000417>>.
- HOUMING, F. et al. Research on emergency relief goods distribution after regional natural disaster occurring. *2008 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, Ieee, v. 5, p. 156–161, dez. 2008. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4737748>>.
- HUTTER, F.; HOOS, H.; LEYTON-BROWN, K. ParamILS : An automatic algorithm configuration framework. *Journal of Artificial Intelligence Research*, v. 36, p. 267–306, 2009.
- IBGE, I. B. de Geografia e E. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios síntese De Indicadores*. 2009. 288 p.
- ICRC. *Emergency items catalogue*. 2009. Acessado em 26/11/2014. Disponível em: <<http://procurement.ifrc.org/catalogue/>>.
- ILOG. Ibm ilog cplex 12.6 reference manual. 2014. <http://www.ilog.com/products/cplex/>.
- INFONAVIS. *Ficha tecnica Passport 610 Galapagos*. 2014. Acessado em 01/06/2014. Disponível em: <http://www.infonavis.com/fichas_tecnicas/passport_610_galapagos-865-bmft.aspx>.
- JAÂFAR, I. B.; GHÉDIRA, K. Coordination based multiple criteria decision making. *Journal of Decision Systems*, v. 16, n. 1, p. 37–56, 2007. ISSN 1246-0125.
- JIA, H.; ORDÓNEZ, F.; DESSOUKY, M. M. Solution approaches for facility location of medical supplies for large-scale emergencies. *Computers & Industrial Engineering*, v. 52, n. 2, p. 257–276, mar. 2007. ISSN 03608352. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360835206002129>>.

- JUNIOR, I. B.; LEIRAS, A.; YOSHIZAKI, H. Stochastic optimization applied to the pre positioning of disaster relief supplies decisions in Brazil. p. 1–10, 2013.
- KALL, P.; WALLACE, S. W. Stochastic Programming. John Wiley & Sons, p. 326, 1994.
- KELLE, P.; SCHNEIDER, H.; YI, H. Decision alternatives between expected cost minimization and worst case scenario in emergency supply – Second revision. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, p. 1–11, jun. 2014. ISSN 09255273. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925527314001923>>.
- KONGSOMSAKSAKUL, S.; YANG, C.; CHEN, A. Shelter Location-allocation model for flood evacuation planning. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v. 6, p. 4237–4252, 2005.
- LATHAM, M. C. Nutrición humana en el mundo en desarrollo. *FAO Alimentación y nutrición*, v. 29, p. 439–458, 2002.
- LI, L.; JIN, M.; ZHANG, L. Sheltering network planning and management with a case in the Gulf Coast region. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 131, n. 2, p. 431–440, jun. 2011. ISSN 09255273. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925527310004822>>.
- LIBERATORE, F. et al. A hierarchical compromise model for the joint optimization of recovery operations and distribution of emergency goods in Humanitarian Logistics. *Computers & Operations Research*, abr. 2012. ISSN 03050548. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305054812000809>>.
- LIBERATORE, F. et al. Uncertainty in humanitarian logistics for disaster management. a review. In: VITORIANO, B.; MONTERO, J.; RUAN, D. (Ed.). *Decision Aid Models for Disaster Management and Emergencies*. Atlantis Press, 2013, (Atlantis Computational Intelligence Systems, v. 7). p. 45–74. ISBN 978-94-91216-73-2. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2991/978-94-91216-74-9_3>.
- LIN, Y.-H. et al. A logistics model for emergency supply of critical items in the aftermath of a disaster. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 45, n. 4, p. 132 – 145, 2011. ISSN 0038-0121. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038012111000164>>.
- LIN, Y.-H. et al. Location of temporary depots to facilitate relief operations after an earthquake. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 46, n. 2, p. 112 – 123, 2012. ISSN 0038-0121. Modeling Public Sector Facility Location Problems. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003801211200002X>>.
- LODREE, E. J.; BALLARD, K. N.; SONG, C. H. Pre-positioning hurricane supplies in a commercial supply chain. *Socio-Economic Planning Sciences*, Elsevier Ltd, v. 46, n. 4, p. 291–305, dez. 2012. ISSN 00380121. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038012112000183>>.
- METE, H. O.; ZABINSKY, Z. B. Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 126, n. 1, p. 76–84, jul. 2010. ISSN 09255273. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925527309003582>>.
- MI, M. *Manual de planejamento em defesa civil volume 2-3*. 1999. Acessado em 26/10/2014. Disponível em: <<http://www.defesacivil.mg.gov.br/conteudo/arquivos/manuais/Manuais-de-Defesa-Civil/Manual-PLANEJAMENTO-2.pdf>>.

- MORENO, A.; ALEM, D.; FERREIRA, D. Heuristic approaches for the multiperiod location-transportation problem with reuse of vehicles in emergency logistics. *Submitted for review*, 2015.
- MURALI, P.; ORDÓÑEZ, F.; DESSOUKY, M. M. Facility location under demand uncertainty: Response to a large-scale bio-terror attack. *Socio-Economic Planning Sciences*, Elsevier Ltd, v. 46, n. 1, p. 78–87, 2012. ISSN 00380121. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038012111000450>>.
- NA, L.; ZHI, L. Emergency relief goods multi-mode transportation based on genetic algorithm. *2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, Ieee, p. 181–184, 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5287678>>.
- NOLZ, P. C. et al. A bi-objective metaheuristic for disaster relief operation planning. *Adv. in Multi-Obj. Nature Inspired Computing*, v. 272, p. 167–187, 2010.
- NOYAN, N. Risk-averse two-stage stochastic programming with an application to disaster management. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 39, n. 3, p. 541–559, mar. 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305054811000931>>.
- NUPDEC. *Comunidade de Barranca, no Sul do Estado, recebe barco da Defesa Civil*. 2013. Acessado em 01/06/2014. Disponível em: <<http://www.sc.gov.br/index.php/component/acymailing/archive/view/listid-56-sites-sul/mailid-159-comunidade-de-barranca-no-sul-do-estado-recebe-barco-da-defesa-civil/tmpl-component>>.
- ORTUÑO, M. T. et al. Decision Aid Models for Disaster Management and Emergencies. *Atlantis Computational Intelligence Systems*, Atlantis Press, Paris, v. 7, p. 17–45, 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.2991/978-94-91216-74-9>>.
- OZDAMAR, L. Planning helicopter logistics in disaster relief. *OR Spectrum*, v. 33, n. 3, p. 655–672, jun. 2011. ISSN 0171-6468. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00291-011-0259-y>>.
- OZDAMAR, L.; EKINCI, E.; KUCUKYAZICI, B. Emergency Logistics Planning in Natural Disasters. *Annals of Operations Research*, v. 129, n. 1-4, p. 217–245, jul. 2004. ISSN 0254-5330. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1023/B:ANOR.0000030690.27939.39>>.
- PÉREZ-RODRÍGUEZ, N.; HOLGUÍN-VERAS, J. Inventory-allocation distribution models for postdisaster humanitarian logistics with explicit consideration of deprivation costs. *Transportation Science*, p. 1–25, 2015.
- POCHET, Y.; WOLSEY, L. A. *Production Planning by Mixed Integer Programming*. [S.l.]: Springer, 2006. 500 p. ISBN 978-0-387-33477-6.
- POPKIN, B. M.; ROSENBERG, I. H. Water, Hydration and Health. *Nutrition Reviews*, v. 68, n. 8, p. 439–458, 2011.
- RATH, S.; GENDREAU, M.; GUTJAHR, W. J. Bi-objective stochastic programming models for determining depot locations in disaster relief operations. *International Transactions in Operational Research*, v. 00, p. n/a–n/a, 2015. ISSN 09696016. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/itor.12163>>.
- RATH, S.; GUTJAHR, W. J. A math-heuristic for the warehouse location–routing problem in disaster relief. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 42, p. 1–15, jul. 2011. ISSN 03050548. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305054811002097>>.

RAWLS, C. G.; TURNQUIST, M. a. Pre-positioning of emergency supplies for disaster response. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier Ltd, v. 44, n. 4, p. 521–534, maio 2010. ISSN 01912615.

RAWLS, C. G.; TURNQUIST, M. a. Pre-positioning and dynamic delivery planning for short-term response following a natural disaster. *Socio-Economic Planning Sciences*, Elsevier Ltd, v. 46, n. 1, p. 46–54, mar. 2012. ISSN 00380121. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038012111000498>>.

RIC. *Custo anual de dois helicópteros doados*. 2013. Acessado em 01/06/2014. Disponível em: <<http://ndonline.com.br/joinville/noticias/116790-custo-anual-de-dois-helicopteros-custaria-r-6-milhoes-para-santa-catarina.html>>.

RIO DE JANEIRO. *Resolução Nº 09/2011 da assembléia legislativa do estado do Rio de Janeiro*. 2011. 261 p.

ROMERO, C. 1 - an introductory overview of goal programming (gp) and some related multiple criteria decision making (mcdm) approaches1. In: ROMERO, C. (Ed.). *Handbook of Critical Issues in Goal Programming*. Amsterdam: Pergamon, 1991. p. 1 – 12. ISBN 978-0-08-040661-9. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080406619500087>>.

ROTTKEMPER, B.; FISCHER, K.; BLECKEN, A. A transshipment model for distribution and inventory relocation under uncertainty in humanitarian operations. *Socio-Economic Planning Sciences*, Elsevier Ltd, v. 46, n. 1, p. 98–109, mar. 2012. ISSN 00380121. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038012111000474>>.

SALMAN, F.; GUNNEC, D. A two-stage multi-criteria stochastic programming model for location of emergency response and distribution centers. *Proceedings of the International Network Optimization Conference (INOC)*, 2007.

SALMERON, J.; APTE, A. Stochastic optimization for natural disaster asset prepositioning. *Production and Operations Management*, v. 19, n. 5, p. 561–574, 2010.

SEEANNER, F.; ALMADA-LOBO, B.; MEYR, H. Combining the principles of variable neighborhood decomposition search and the fix&optimize heuristic to solve multi-level lot-sizing and scheduling problems. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 40, n. 1, p. 303–317, jan. 2013. ISSN 03050548. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305054812001475>>.

SONG, R.; HE, S.; ZHANG, L. Optimum Transit Operations during the Emergency Evacuations. *Journal of transportation sSystems engineering and information technology*, China Association for Science and Technology, v. 9, n. 6, p. 154–160, dez. 2009. ISSN 15706672. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1570667208600963>>.

SRIVASTAV, A.; STANGIER, P. On complexity , representation and approximation of integral multicommodity ows. *Discrete Applied Mathematics 99*, v. 99, p. 183–208, 2000.

TANG, F. et al. An Affinely Adjustable Robust Optimization approach to emergency logistics distribution under uncertain demands. *2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Ieee, p. 1738–1742, dez. 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5373153>>.

THE SPHERE PROJECT. *Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Response*. Northampton: Belmont Press Ltd, 2011. 402 p. ISBN 9781908176004. Disponível em: <<http://practicalaction.org/sphere>>.

TORRE, L. E. D.; DOLINSKAYA, I. S.; SMILOWITZ, K. R. Disaster relief routing: Integrating research and practice. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 46, p. 88–97, 2012.

TZENG, G.-h.; CHENG, H.-J.; HUANG, T. D. Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems. *Transportation Research Part E*, v. 43, p. 673–686, 2007.

VALENCIO, N. Desastres , Ordem Social e Planejamento em Defesa Civil : o contexto brasileiro. *Saúde e Sociedade*, v. 19, n. 4, p. 748–762, 2010.

VISWANATH, K.; PEETA, S. Multicommodity maximal covering network design problem for planning critical routes for earthquake response. *Transportation Research Record*, v. 1857, p. 1–10, 2003.

VITORIANO, B. n. et al. A multi-criteria optimization model for humanitarian aid distribution. *Journal of Global Optimization*, v. 51, n. 2, p. 189–208, set. 2011. ISSN 09255001. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10898-010-9603-z>>.

WIDENER, M. J.; HORNER, M. W. A hierarchical approach to modeling hurricane disaster relief goods distribution. *Journal of Transport Geography*, Elsevier Ltd, v. 19, n. 4, p. 821–828, jul. 2011. ISSN 09666923. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096669231000164X>>.

WOHLGEMUTH, S.; OLORUNTOBA, R.; CLAUSEN, U. Dynamic vehicle routing with anticipation in disaster relief. *Socio-Economic Planning Sciences*, Elsevier Ltd, v. 46, n. 4, p. 261–271, dez. 2012. ISSN 00380121. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038012112000304>>.

YI, W.; KUMAR, A. Ant colony optimization for disaster relief operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 43, n. 6, p. 660–672, nov. 2007. ISSN 13665545. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136655450700021X>>.

YI, W.; OZDAMAR, L. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. *European Journal of Operational Research*, v. 179, n. 3, p. 1177–1193, jun. 2007. ISSN 03772217. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221706000932>>.

ZHENG, Y.-J.; CHEN, S.-Y.; LING, H.-F. Evolutionary optimization for disaster relief operations: A survey. *Applied Soft Computing*, Elsevier B.V., p. 1–14, out. 2014. ISSN 15684946. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1568494614004943>>.

Apêndice A

MODELOS MATEMÁTICOS PRELIMINARES

Dois modelos matemáticos foram desenvolvidos inicialmente para representar o problema de localização e distribuição de produtos com dimensionamento da frota (MORENO; ALEM; FERREIRA, 2015), os quais são apresentados a seguir.

A.1 Modelo FRFS (*Facility routing with fleet sizing decisions under uncertainty*)

Nesse modelo, a cada veículo é designado uma única viagem entre depósitos e centros de auxílio e não se considera o tempo de transporte entre os nós. Os parâmetros e variáveis são similares aos utilizados no modelo FRFSTMP apresentado no Capítulo 3, porém, as decisões de transporte são por período e não por subperíodo.

Seja Λ o conjunto de todas as variáveis de decisão. O modelo FRFS é formulado da seguinte forma:

$$\min_{\Lambda} \quad YC^{new} + YC^{oper} + NC + VC + ZC + IC + UC \quad (\text{A.1})$$

em que

$YC^{new} = \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \alpha_j^{new} \cdot Y_{jt}^{new}$ é o custo total de abertura dos centros de auxílio;

$YC^{oper} = \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \alpha_j^{oper} \cdot Y_{jt}^{oper}$ é o custo total de operação dos centros de auxílio;

$NC = \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \beta_l \cdot N_{ilt}$ é o custo total pela designação (contratação) dos veículos;

$VC = \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \gamma_{ijl} \cdot V_{ijlt}(\xi)$ é o custo total de transporte;

$ZC = \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \delta_{kj} \cdot Z_{wkt}(\xi)$ é o custo total pelo atendimento da demanda;

$IC = \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \phi_w^+ \cdot I_{wjt}^{rc}(\xi)$ é o custo total de estoque nos centros de auxílio;

$UC = \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \phi_w^- \cdot U_{wjt}(\xi)$ é a penalidade total por demanda insatisfeita.

sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} P_{wijlt}(\xi) + \rho_{wjt}(\xi) \cdot I_{wj(t-1)}^{rc}(\xi) = \sum_{k \in \mathcal{K}} Z_{wkt}(\xi) + I_{wjt}^{rc}(\xi), \quad \forall w \in \mathcal{W}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (\text{A.2})$$

$$q_{wit}(\xi) + I_{wi(t-1)}^d(\xi) = \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{l \in \mathcal{L}} P_{wijlt}(\xi) + I_{wit}^d(\xi), \quad \forall w \in \mathcal{W}, i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (\text{A.3})$$

$$U_{wkt}(\xi) = d_{wkt}(\xi) - \sum_{j \in \mathcal{J}} Z_{wkt}(\xi) + U_{wk(t-1)}, \quad \forall w \in \mathcal{W}, k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (\text{A.4})$$

$$\sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} b_w \cdot P_{wijlt}(\xi) + \sum_{w \in \mathcal{W}} b_w \cdot I_{wj(t-1)}^{rc} \leq k_j^c \cdot Y_{jt}^{oper}, \quad \forall j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (\text{A.5})$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} P_{wijlt}(\xi) + I_{wj(t-1)}^{rc}(\xi) \leq k_{wj}^{cp} \cdot Y_{jt}^{oper}, \quad \forall w \in \mathcal{W}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (\text{A.6})$$

$$V_{ijlt}(\xi) \geq \frac{\sum_{w \in \mathcal{W}} b_w \cdot P_{wijlt}(\xi)}{k_l^v}, \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (\text{A.7})$$

$$V_{ijlt}(\xi) \geq \frac{\sum_{w \in \mathcal{W}} b_w' \cdot P_{wijlt}(\xi)}{k_l^{lv}}, \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (\text{A.8})$$

$$V_{ijlt}(\xi) \leq k_{ijl}^{arc} \cdot u_{ijlt}(\xi), \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (\text{A.9})$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} N_{ilt} \leq k_l^n, \quad \forall l \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}. \quad (\text{A.10})$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} V_{ijlt}(\xi) \leq N_{ilt}, \quad \forall i \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (\text{A.11})$$

$$Y_{jt}^{oper} \geq Y_{j(t-1)}^{oper}, \quad \forall j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}. \quad (\text{A.12})$$

$$Y_{jt}^{new} \geq Y_{jt}^{oper} - Y_{j(t-1)}^{oper}, \quad \forall j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}. \quad (\text{A.13})$$

$$\mathbf{Y}^{oper} \in \mathbb{B}^{|\mathcal{J}| \times |\mathcal{T}|}. \quad (\text{A.14})$$

$$\mathbf{Y}^{new} \in \mathbb{R}^+. \quad (\text{A.15})$$

$$\mathbf{N} \in \mathbb{R}^+. \quad (\text{A.16})$$

$$\mathbf{V}(\xi) \in \mathbb{Z}^+, \quad \forall \xi \in \Xi. \quad (\text{A.17})$$

$$\mathbf{P}(\xi), \mathbf{Z}(\xi), \mathbf{I}^{rc}(\xi), \mathbf{U}(\xi), \mathbf{I}^d(\xi) \in \mathbb{R}^+, \quad \forall \xi \in \Xi. \quad (\text{A.18})$$

A função objetivo (A.1) minimiza o custo total esperado, composto pelos custos de primeiro estágio (abertura e operação dos centros de auxílio e designação de veículos) e pelos custos de segundo estágio (transporte, estoque, atraso e atendimento da demanda). As restrições (A.2) e (A.3) garantem a conservação do fluxo de produtos nos centros de auxílio e nos depósitos, respectivamente. Na restrição (A.2), o estoque que pode ser utilizado de um período para o seguinte é reduzido pela proporção de estoque utilizável $\rho_{wjt}(\xi)$. A restrição (A.4) determina a

demanda insatisfeita das áreas afetadas. Sem perda de generalidade, assume-se que os estoques e atraso iniciais são nulos, i.e., $U_{wj0}(\xi) = I_{wj0}^{rc}(\xi) = I_{wi0}^d(\xi) = 0$.

As restrições (A.5) e (A.6) garantem que só pode existir transporte numa rota $i \rightarrow j$ se o centro de auxílio j está em operação. Além disso, se o centro de auxílio j está em operação, essas duas restrições limitam o fluxo de produtos de acordo com a sua capacidade total e por produto.

As restrições (A.7) e (A.8) determinam o número mínimo de veículos necessários para realizar o transporte de produtos dos depósitos aos centros de auxílio no segundo estágio, respeitando as capacidades (peso e volume) dos veículos. A restrição (A.9) garante que o veículo l só pode percorrer a rota $i \rightarrow j$ no período t no cenário ξ se a rota estiver disponível, i.e., $u_{ijlt}(\xi) = 1$. Esta restrição também limita o número de veículos que podem ser utilizados à capacidade de transporte na rota k_{ijl}^{arc} . A restrição (A.10) limita o número de veículos de cada tipo que podem ser contratados por período no primeiro estágio. A restrição (A.11) assegura que somente os veículos contratados no primeiro estágio podem fazer o transporte no segundo estágio. Embora em situações práticas a capacidade dos arcos k_{ijl}^{arc} não limita a utilização de veículos, esse parâmetro oferece um limitante superior para a variável discreta $V_{ijlt}(\xi)$. Se o número máximo de veículos k_l^n que podem ser contratados é grande o suficiente, a restrição (A.10) é redundante, e pode ser eliminada ou utilizada para estabelecer limitantes para as variáveis N_{lit} e $V_{ijlt}(\xi)$.

A restrição (A.12) garante que os centros de auxílio abertos devem permanecer em operação até o final das operações humanitárias. A restrição (A.13) associa as variáveis de decisão de abertura àquelas referentes à operação dos mesmos. As restrições (A.14), (A.15), (A.16) (A.17) e (A.18) representam o domínio das variáveis de decisão.

A.2 Modelo FRFST (*Facility routing with fleet sizing decisions and travel times under uncertainty*)

Diferente do modelo anterior, o modelo FRFST considera o tempo de transporte e a possibilidade da reutilização de veículos dentro de um mesmo período, o que permite reduzir o custo fixo total de contratação dos veículos. Estas considerações são relevantes pois permitem obter soluções mais eficientes (de menor custo), principalmente em situações com recursos escassos. Para definir o modelo FRFST, são considerados os parâmetros e variáveis do modelo FRFS e a seguinte notação matemática adicional.

Conjuntos

\mathcal{L}' Conjunto dos veículos disponíveis.

Parâmetros determinísticos

η_t Tamanho do período t .

M Número suficientemente grande, pode ser estabelecido como η_t .

Variáveis de decisão de primeiro estágio

N'_{ilt} = 1 se o veículo l é designado no depósito i no período t ;
= 0, caso contrário.

Variáveis de decisão de segundo estágio

$V'_{ijlt}(\xi)$ Número de vezes que o veículo l percorre a rota $i \rightarrow j$ no período t no cenário ξ .

Note que o modelo FRFST considera um novo conjunto \mathcal{L}' de todos os possíveis veículos, enquanto que o modelo FRFS considera o conjunto \mathcal{L} apenas dos tipos de veículos disponíveis. Para instâncias similares, $|\mathcal{L}'| > |\mathcal{L}|$. São consideradas duas novas variáveis N'_{ilt} e $V'_{ijlt}(\xi)$ que substituem as variáveis N_{lit} e $V_{ijlt}(\xi)$, respectivamente. O parâmetro η_t é expresso na mesma unidade do parâmetro ℓ_{ijl} , e.g., para ℓ_{ijl} em blocos de duas horas, $\eta_t = 12$ indica que o dia t tem 12 blocos de duas horas.

A função objetivo (A.19) diferencia-se da função objetivo (A.1) pelo conjunto \mathcal{L}' no lugar do conjunto \mathcal{L} . Além disso, foram substituídas as variáveis $V_{ijlt}(\xi)$ e N_{lit} por $V'_{ijlt}(\xi)$ e N'_{lit} , respectivamente, como mostrado a seguir:

$$\min_{\Lambda} \quad YC^{new} + YC^{oper} + NC' + VC' + ZC + IC + UC \quad (\text{A.19})$$

em que $NC' = \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}'} \sum_{t \in \mathcal{T}} \beta_l \cdot N'_{ilt}$ é o custo total pela designação dos veículos;

$VC' = \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{l \in \mathcal{L}'} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \gamma_{ijl} \cdot V'_{ijlt}(\xi)$ é o custo total de transporte;

As restrições (A.2), (A.3), (A.4), (A.5), (A.6), (A.13) e (A.14) diferenciam-se das correspondentes decisões do modelo FRFS somente pela substituição do conjunto \mathcal{L}' no lugar do conjunto \mathcal{L} . As demais restrições foram modificadas conforme segue.

$$V'_{ijlt}(\xi) \geq \frac{\sum_{w \in \mathcal{W}} b_w \cdot P_{wijlt}(\xi)}{k_l^v}, \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}', t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (\text{A.20})$$

$$V'_{ijlt}(\xi) \geq \frac{\sum_{w \in \mathcal{W}} b'_w \cdot P_{wijlt}(\xi)}{k_l^{lv}}, \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}', t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (\text{A.21})$$

$$V'_{ijlt}(\xi) \leq M \cdot u_{ijlt}(\xi) \cdot N_{ilt}, \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}', t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (\text{A.22})$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} 2 \cdot \tau_{ijl} \cdot V'_{ijlt}(\xi) \leq \ell_t, \quad \forall i \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{L}', t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (\text{A.23})$$

$$\mathbf{N}' \in \mathbb{B}^{|\mathcal{I}| \times |\mathcal{L}'| \times |\mathcal{T}|}. \quad (\text{A.24})$$

$$\mathbf{V}'(\xi) \in \mathbb{Z}^+, \quad \forall \xi \in \Xi. \quad (\text{A.25})$$

As restrições (A.20) e (A.21) determinam o número mínimo de veículos necessários para realizar o transporte de produtos dos depósitos aos centros de auxílio no segundo estágio, respeitando as capacidades (peso e volume) dos veículos. A restrição (A.22) assegura que só os veículos contratados no primeiro estágio podem transportar produtos pelos arcos disponíveis no segundo estágio. Note que para existir transporte no segundo estágio a rota deve estar disponível ($u_{ijlt}(\xi) = 1$) e o veículo deve ser contratado ($N'_{lit} = 1$). A restrição (A.23) limita o tempo total de transporte dos veículos ao tamanho do período, i.e., a soma dos percursos dos veículos num período tem que ser menor do que o tamanho do período. As restrições (A.24) e (A.25) representam o domínio das variáveis de decisão. O modelo FRFST não considera restrições que limitem o número de veículos que podem ser utilizados, nem restringe o fluxo de veículos pela rota $i \rightarrow j$ à capacidade da rota k_{ijl}^{arc} . Estas restrições podem ser consideradas na construção do conjunto \mathcal{L}' , i.e., o número de veículos de cada tipo no conjunto \mathcal{L}' é tal que essas restrições são respeitadas.

Note que o modelo FRFST é, em teoria, mais difícil de ser resolvido do que o modelo FRFS, pois existe uma nova variável discreta (N'_{ilt}) e um novo conjunto \mathcal{L}' com cardinalidade maior ou igual a do conjunto \mathcal{L} , o que aumenta o número de variáveis e restrições. Porém, espera-se que a reutilização produza soluções de menor custo (a frota é menos superestimada) e com maior nível de serviço.

A.3 Desempenho das estratégias CPLEX na solução dos modelos FRFS e FRFST

Antes de implementar os métodos heurísticos propostos, foram realizados estudos computacionais com algumas configurações alternativas dos parâmetros do *solver* CPLEX na resolução dos modelos FRFS e FRFST. A Tabela A.1 resume as estratégias CPLEX testadas. As estratégias CPX14 e CPX15 foram criadas a partir do análise do desempenho das demais estratégias nos testes computacionais.

A estratégia CPX15 foi a que apresentou os melhores resultados, com os melhores *gaps* para 12,5% (50%) das instâncias no modelo FRFS (FRFST), e o menor tempo computacional em 33,3% (66,6%) das instâncias para o modelo FRFS (FRFST). A Tabela A.2 mostra a melhoria da estratégia CPX15 em relação à estratégia CPLEX *default* (CPX1). A melhoria foi mais significativa no modelo FRFS, no qual a média do custo total esperado, do tempo computacional e do *gap* diminuíram em 49,3%, 85% e 88,9%, respectivamente. Adicionalmente, foi encontrada uma redução importante nas instâncias médias do modelo FRFST; em média, os custos, o

Tabela A.1: Estratégias CPLEX testadas para os modelos FRFS e FRFST.

	Default	Planos de corte	Pré-solver	Heurística RINS	Algoritmo utilizado na relaxação e nos nós
CPX1	x				
CPX2	x	off			
CPX3	x		off		
CPX4	x			off	
CPX5	x			100	
CPX6	x	off		off	
CPX7	x	off	off		
CPX8	x	off		10	
CPX9	x	off		100	
CPX10	x	off			Primal
CPX11	x	off			Dual
CPX12	x	off			Network
CPX13	x	off			Barrier
CPX14	x				Dual
CPX15	x	off		100	Dual

tempo computacional e o *gap* diminuíram em 15,3%, 68,4% e 86,5%, respectivamente para essas instâncias. A melhor configuração dos parâmetros CPLEX (estratégia CPX15) foi utilizada para resolver os subproblemas nos métodos heurísticos propostos.

Tabela A.2: Média dos resultados da estratégia CPLEX *default* (CPX1) e da melhor estratégia CPLEX (CPX15).

Conjunto de instâncias	CPX1 <i>Default</i>			CPX15 (Melhor estratégia)		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (seg.)	GAP (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (seg.)	GAP (%)
Modelo FRFS						
Pequenas	34,950	32.8	9.50	34,926	35.7	9.40
Médias	108,324,706	237.5	0.500	108,675,417	35.7	0.600
Grandes	3,960,161,895	3,600	87.6	510,451,578	1,891	0.800
Média	1,356,173,850	1,290	32.5	206,387,307	654.2	3.60
Modelo FRFST						
Pequenas	40,674	12.8	28.6	40,585	22,8	28.5
Médias	25,814,099	3,600	23.7	21,868,081	1,136	3.20
Grandes	3,801,623,838	3,600	98.8	3,801,623,838	3,600	98.8
Média	1,275,826,204	2,404	50.4	1,274,510,835	1,586	43.5

A.4 Desempenho das estratégias *relax-and-fix* e *fix-and-optimize* na solução dos modelos FRFS e FRFST

Sete heurísticas de cada tipo foram propostas para resolver os modelos FRFS e FRFST com base nas partições apresentadas na Tabela A.3.

A Tabela A.4 resume o resultado das melhores estratégias testadas para o modelo FRFS, i.e., CPX15, RFX6 e FXO2. Claramente, a estratégia CPX15 melhora as estratégias heurísticas

Tabela A.3: Partição de variáveis nas heurísticas *relax-and-fix* (RFX) e *fix-and-optimize* (FXO) para os modelos FRFS e FRST.

Estratégia	Partição das variáveis (para RFX e FXO)	Variáveis fixadas (para RFX)
RFX1 e FXO1	Por período. Forward.	$\mathbf{Y}^{oper}, \mathbf{Y}^{new}, \mathbf{N}, \mathbf{V}(\xi)$
RFX2 e FXO2	Por período. Backward.	$\mathbf{Y}^{oper}, \mathbf{Y}^{new}, \mathbf{N}, \mathbf{V}(\xi)$
RFX3 e FXO3	Por cenário. Forward.	$\mathbf{V}(\xi), \mathbf{I}^{rc}(\xi), \mathbf{U}(\xi), \mathbf{I}^d(\xi)$
RFX4 e FXO4	Por cenário. Backward.	$\mathbf{V}(\xi), \mathbf{I}^{rc}(\xi), \mathbf{U}(\xi), \mathbf{I}^d(\xi)$
RFX5 e FXO5	Por período (Forward). Dentro dos períodos por cenário (Forward).	$\mathbf{Y}^{oper}, \mathbf{Y}^{new}, \mathbf{N}, \mathbf{V}(\xi), \mathbf{I}^{rc}(\xi), \mathbf{U}(\xi), \mathbf{I}^d(\xi)$
RFX6 e FXO6	Segundo estágio e primeiro estágio. Segundo estágio, por cenário (Forward).	$\mathbf{V}(\xi), \mathbf{I}^{rc}(\xi), \mathbf{U}(\xi), \mathbf{I}^d(\xi)$
RFX7 e FXO7	Segundo estágio e primeiro estágio. Segundo estágio, por cenário (Backward).	$\mathbf{V}(\xi), \mathbf{I}^{rc}(\xi), \mathbf{U}(\xi), \mathbf{I}^d(\xi)$

em relação ao gap. No entanto, o valor da função objetivo é similar nas três estratégias para a maioria das instâncias. A diferença entre o valor médio da função objetivo das três estratégias é menor do que 1%. Por outro lado, as melhores heurísticas (RFX6,FXO2) são claramente mais rápidas do que a estratégia CPX15. Em média, a diminuição no tempo computacional é quase de 40% e 60% resolvendo o modelo FRFS com RFX6 e FXO2 em relação a resolvê-lo com a melhor estratégia CPLEX (CPX15). Note que FXO2 é melhor do que RFX6 em gap e tempo computacional para as instâncias pequenas. Para as instâncias médias, RFX6 é mais eficiente do que FXO2 em ambos os critérios. Para as instâncias grandes, RFX6 melhora FXO2 em gap, mas a estratégia FXO2 é significativamente mais rápida do que RFX6.

Tabela A.4: Melhores estratégias de solução para o modelo FRFS.

Ins tân cia	CPX15			RFX6			FXO2		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (sec.)	Gap (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (sec.)	Gap (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (sec.)	Gap (%)
S1	36.928	21,30	0,9306	42.306	16,09	13,53	37.666	4,554	2,874
S2	25.164	48,10	0,9907	31.312	14,23	20,66	25.908	4,521	3,836
S3	38.595	22,01	0,6581	47.083	23,23	17,54	40.218	5,395	4,666
S4	36.928	17,45	0,9488	42.301	8,734	13,53	37.442	4,761	2,310
S5	36.928	27,43	0,9306	42.308	8,719	13,64	37.530	4,760	2,522
S6	45.864	21,60	0,5816	53.202	12,42	13,31	48.841	5,229	6,642
S7	38.728	31,76	0,7497	53.986	26,17	28,82	41.324	4,696	6,985
S9	20.272	95,92	0,9587	27.788	16,42	24,45	20.453	4,146	1,833
M1	17.264.200	28,88	0,2653	17.256.362	10,75	0,2200	17.700.298	20,03	2,723
M2	2.833.673	73,45	0,4232	2.888.340	11,39	2,308	2.848.868	13,00	0,9543
M3	754.141.193	57,80	0,6378	749.939.664	12,06	0,0811	753.618.566	15,75	0,5688
M4	17.330.486	24,20	0,6488	17.311.789	6,584	0,5415	17.632.917	17,01	2,353
M5	17.247.671	23,70	0,1486	17.309.070	10,97	0,5028	17.550.183	22,18	1,870
M6	35.592.052	16,16	0,1496	35.627.710	10,48	0,2495	36.233.600	24,59	1,918
M7	17.290.040	19,56	0,3479	17.290.058	11,17	0,3480	17.736.298	19,30	2,855
M9	7.704.019	41,54	0,3284	7.755.449	10,78	0,9893	7.961.715	23,06	3,554
L1	31.663.612	1.148	0,6677	32.379.024	1.526	2,862	33.066.392	850,6	4,882
L2	15.969.446	3.600	0,7586	16.205.635	1.164	2,205	16.771.097	786,8	5,502
L3	3.827.429.380	578,7	0,0760	3.866.791.908	416,4	1,093	3.839.021.220	97,00	0,3777
L4	31.666.987	1.374	0,6862	32.263.784	812,4	2,523	33.531.725	387,5	6,209
L5	33.623.502	1.471	0,5447	33.854.477	1.393	1,223	34.950.944	842,0	4,322
L6	97.006.622	1.189	0,6456	98.731.348	1.094	2,381	104.541.972	1.043	7,807
L7	31.662.914	2.169	0,6860	32.051.119	1.562	1,889	33.138.392	846,7	5,108
L9	14.590.159	3.600	0,8455	14.781.780	1.481	2,131	15.363.632	844,6	5,837
Mé- dia	206.387.307	654,2	0,6090	208.032.409	402,5	6,960	207.581.550	245,4	3,688

Melhores resultados para gap. Melhores resultados para tempo computacional.

A Tabela A.5 resume o resultado das melhores estratégias testadas para o modelo FRFST, i.e., CPX15, RFX3 e FXO2. Diferente dos resultados no modelo FRFS, ambas estratégias heurísticas (RFX3,FXO2) melhoraram significativamente, em média, o valor da função objetivo e o tempo computacional da estratégia CPX15. Porém, a estratégia CPX15 continua apresentando os menores gaps para as instâncias pequenas e médias. A melhoria das heurísticas foi principalmente no tempo das instâncias pequenas e médias e na função objetivo das instâncias grandes. Com CPX15 os gaps nas instâncias grandes eram maiores do que 99%, enquanto que com RFX3 e FXO2 foram obtidos gaps menores do que 97% e 64%, respectivamente, no limite de tempo de 3.600 segundos. O valor médio da função objetivo foi 93,6% e 98,7% menor com as estratégias RFX3 e FXO2 do que com a estratégia CPX15. A heurística FXO2 apresentou um menor tempo computacional do que a heurística RFX3 para a maioria das instâncias, porém RFX3 apresentou menores gaps do que FXO2 para instâncias pequenas e médias. Para as instâncias grandes, no entanto, é a heurística FXO2 a que apresenta os menores gaps. Note que com todas as estratégias foi atingido o tempo limite estabelecido de 3.600 segundos nas instâncias grandes.

Tabela A.5: Melhores estratégias de solução para o modelo FRFST.

Ins tân cia	CPX15			RFX3			FXO2		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (sec.)	Gap (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (sec.)	Gap (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (sec.)	Gap (%)
S1	30.267	17,16	0,7920	30.357	14,45	1,086	31.889	6,035	5,840
S2	18.152	19,32	0,3608	18.196	13,95	0,5986	18.217	5,601	0,7143
S4	30.267	7,844	0,4476	30.331	4,563	0,6592	31.634	4,491	4,752
S5	30.267	10,79	0,7261	30.331	13,11	0,9371	31.895	6,383	5,795
S6	57.614	15,65	0,7221	57.902	3,750	1,215	66.120	3,276	13,49
S7	34.840	53,06	0,2698	34.905	8,704	0,4568	39.249	5,837	11,47
S8	105.410	4,008	0,3999	105.980	2,282	0,8242	113.291	1,113	7,224
S9	17.861	54,31	0,7932	17.861	28,63	0,7932	18.536	6,021	4,408
M1	15.848.987	797,0	0,6581	15.786.525	948,9	0,2650	16.178.331	656,5	2,680
M2	1.539.235	3.600	0,7295	1.541.390	2.407	0,8683	1.567.880	1.300	2,543
M4	17.190.605	513,0	0,2497	17.212.601	677,1	0,3772	17.541.857	209,0	2,247
M5	16.317.562	843,0	0,5803	16.335.465	954,8	0,6892	16.771.335	704,9	3,270
M6	38.120.964	373,0	0,2937	38.339.079	706,9	0,8610	38.449.435	257,3	1,146
M7	15.816.470	913,0	0,3906	15.801.127	967,8	0,2939	16.169.068	554,3	2,563
M8	63.346.264	107,0	0,1288	63.415.328	429,4	0,2375	63.796.957	223,2	0,8343
M9	6.764.563	1.945	1,015	6.757.833	2.086	0,9165	6.924.043	303,2	3,295
L1	4.055.065.427	3.600	99,64	499.268.869	3.600	97,12	23.147.709	3.600	37,78
L2	4.055.065.427	3.600	99,86	41.714.311	3.600	86,10	11.585.533	3.600	49,94
L4	4.055.065.427	3.600	99,44	188.102.025	3.600	88,00	23.808.501	3.600	5,171
L5	4.055.065.427	3.600	99,63	92.497.322	3.600	83,89	24.169.915	3.600	38,34
L6	4.055.065.427	3.600	99,38	102.197.279	3.600	75,39	31.270.517	3.600	19,59
L7	4.055.065.427	3.600	99,64	218.170.374	3.600	93,32	24.452.078	3.600	40,44
L8	4.055.065.427	3.600	99,08	579.281.466	3.600	93,58	46.164.860	3.600	19,38
L9	2.027.532.714	3.600	99,76	51.542.229	3.600	90,38	13.799.168	3.600	64,07
Mé- dia	1.274.510.835	1.586	33,54	81.178.712	1.586	29,95	15.672.834	1.377	14,46

Melhores resultados para gap, Melhores resultados para tempo computacional.

A.5 Análise bi-objetivo dos modelos FRFS e FRFST

A fim de verificar o impacto desses tipos de custos nos modelos foram realizados testes com uma abordagem bi-objetivo para o problema integrado de localização, distribuição e dimensionamento da frota. Dado que os modelos RFFS e FRFST possuem uma função objetivo similar, pois em ambos são considerados os mesmos tipos de custos, a análise é realizada com base no modelo RFFS. O objetivo humanitário (F_1) considera a minimização da penalidade por demanda insatisfeita, e o objetivo financeiro (F_2) consiste na minimização dos custos logísticos, compostos pelos custos de abertura e operação dos centros de auxílio, contratação de veículos, estoque e atendimento da demanda. Os dois objetivos são mostrados a seguir:

$$\min F_1 = UC \quad (\text{A.26})$$

$$\min F_2 = YC^{new} + YC^{oper} + NC + VC + ZC + IC \quad (\text{A.27})$$

No contexto da logística humanitária vários métodos de otimização multiobjetivo tem sido aplicados com sucesso (TZENG; CHENG; HUANG, 2007; VITORIANO et al., 2011; LIBERATORE et al., 2012; BOZORGI-AMIRI; JABALAMELI; AL-E-HASHEM, 2013; RATH; GENDREAU; GUTJAHR, 2015). Destacam-se entre eles a otimização hierárquica (*hierarchical optimization*), a programação por metas (*goal programming*) e o método epsilon-restrito (*epsilon constraint method*). A Tabela A.6 apresenta a formulação matemática bi-objetivo do modelo FRFS de acordo com cada um dos métodos.

Tabela A.6: Formulação matemática bi-objetivo do problema de localização, distribuição e dimensionamento da frota.

Método	Modelo bi-objetivo
Otimização hierárquica	$\min F_2$
	<i>s.a.</i> Restrições (A.2)-(A.18) do modelo FRFS $F_1 \leq \alpha \cdot F_1^*$
Programação por metas	$\min \omega \cdot \lambda_1 + (1 - \omega) \cdot \lambda_2$
	<i>s.a.</i>
	Restrições (A.2)-(A.18) do modelo FRFS
	$F_1 - \lambda_1 \geq F_1^*$ $F_2 - \lambda_2 \geq F_2^*$ $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}^+$
Epsilon-restrito	$\min F_1$
	<i>s.a.</i> Restrições (A.2)-(A.18) do modelo FRFS $F_2 \leq \sigma$

Em que:

- F_1^* é o valor ótimo do objetivo F_1 , i.e., o valor ótimo quando o modelo FRFS é resolvido considerando apenas minimizar o objetivo F_1 .
- F_2^* é o valor ótimo do objetivo F_2 .
- $\alpha \geq 1$ é um parâmetro que flexibiliza a abordagem hierárquica, permitindo que o objetivo prioritário F_1 não seja necessariamente atingido no seu valor ótimo F_1^* . $\alpha = 2$, por exemplo, permite que o objetivo prioritário F_1 seja, no máximo, duas vezes o valor ótimo F_1^* .
- $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}^+$ são as variáveis que determinam o desvio entre o valor dos objetivos (F_1, F_2) e as metas propostas (F_1^*, F_2^*) no método de programação por metas e ω representa o peso/importância atribuída ao objetivo F_1 . No método de programação por metas alguns autores utilizam na função objetivo o desvio sob o valor da meta definida, i.e., $\min \frac{\omega \cdot \lambda_1}{F_1^*} + \frac{(1-\omega) \cdot \lambda_2}{F_2^*}$, porém, nesse trabalho a meta proposta para F_2 é o custo logístico ótimo $F_2^* = 0$ e portanto não pode ser considerado como divisor.
- σ é um parâmetro que indica o limitante superior considerado para o objetivo F_2 no método epsilon-restrito.

observe que mudando os parâmetros α , ω e σ podem ser obtidas diferentes soluções para os objetivos (F_1, F_2) nos métodos hierárquico, de programação por metas e epsilon-restrito, respectivamente.

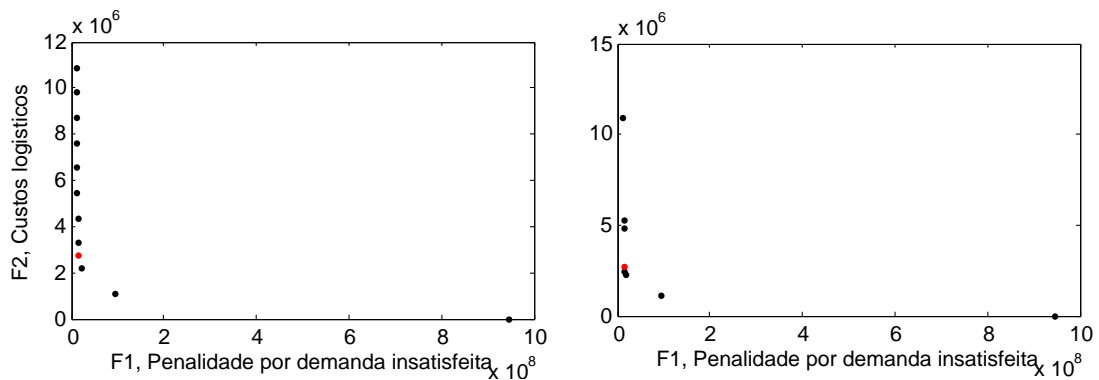
A.5.1 Conjunto Pareto-ótimo

Nos modelos de otimização bi-objetivo propostos na Tabela A.6 existe um *trade-off* entre dois objetivos conflitantes, minimizar o custo humanitário e minimizar o custo logístico. Para modelos desse tipo geralmente não existe uma solução factível que produza de forma simultânea o valor ótimo para os dois objetivos, mas sim um conjunto de soluções que formam o denominado conjunto Pareto-ótimo. O conjunto Pareto-ótimo é o conjunto de soluções não dominadas encontradas num problema de otimização multiobjetivo. A definição de solução dominada é mostrada a seguir (JAËFAR; GHÉDIRA, 2007).

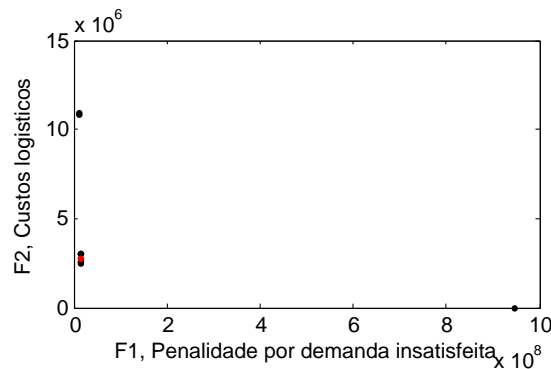
Definição A.5.1 *Para problemas com objetivos de minimização, uma solução fatível \mathbb{X} domina uma solução fatível \mathbb{Y} se e somente se $F_r(\mathbb{X}) \leq F_r(\mathbb{Y})$ para todo objetivo $r \in R$ e $F_r(\mathbb{X}) < F_r(\mathbb{Y})$ para pelo menos um objetivo $r \in R$. R representa o conjunto dos objetivos considerados.*

Em testes computacionais preliminares os três modelos propostos na Tabela A.6 foram utilizados para obter um conjunto Pareto-ótimo de soluções para as instâncias S1, M1 e L1. No método de otimização hierárquica foram geradas 11 soluções factíveis variando o parâmetro α no

intervalo $[1, \frac{F'_1}{F_1^*}]$, em que F'_1 indica o valor do objetivo F_1 quando $F_2 = F_2^*$, i.e., a penalidade por demanda insatisfeita quando o custo logístico é $F_2 = F_2^* = 0$. De forma similar, no método de programação por metas foram obtidas 11 soluções factíveis variando o parâmetro ω no intervalo $[0, 1]$. No método Epsilon-restrito, 11 soluções factíveis foram obtidas variando o parâmetro σ no intervalo $[F_2^*, F'_2]$, em que F'_2 indica o valor do objetivo F_2 quando $F_1 = F_1^*$, i.e., o custo logístico F_2 atingido ao resolver o modelo FRFS minimizando apenas a penalidade por demanda insatisfeita F_1 . Para cada método, após encontrar as 11 soluções factíveis, foram excluídas as soluções dominadas e formado o conjunto Pareto-ótimo com as soluções não dominadas. Na Figura A.1 observa-se o conjunto Pareto-ótimo obtido com cada um dos métodos para a instância M1. O eixo horizontal representa a penalidade por demanda insatisfeita e o eixo vertical representa os custos logísticos. O ponto vermelho indica a solução do modelo FRFS mono-objetivo.



(a) Conjunto Pareto-ótimo (método epsilon-restrito). (b) Conjunto Pareto-ótimo (método hierárquico).



(c) Conjunto Pareto-ótimo (programação por metas).

Figura A.1: Conjuntos Pareto-ótimo obtidos para a instância M1.

Com o método de programação por metas (Figura A.1(c)) só foram obtidos 4 pontos não dominados diferentes na instância M1, pois para vários valores de ω os objetivos F_1 e F_2 não sofrem mudanças. Para as instâncias testadas, todos os valores de $\omega > 0.3$ obtiveram os mesmos valores nos objetivos F_1 e F_2 . Isso é devido ao fato de que a demanda insatisfeita representa

uma parcela maior na função objetivo, pois está mais penalizada do que o transporte e demais operações logísticas. Portanto, até certo ponto, o modelo de programação por metas é pouco suscetível às mudanças no parâmetro ω . Com o método de otimização hierárquica (Figura A.1(b)) e o método epsilon-restrito (Figura A.1(a)) foi maior o número de soluções não dominadas obtidas. Ambos os métodos, como utilizados nesse trabalho, consistem em minimizar um objetivo e considerar o outro objetivo como uma restrição. O método epsilon-restrito, que considera como restrição o objetivo de custos logísticos, oferece soluções que podem ser mais facilmente analisadas do ponto de vista prático, pois o parâmetro σ funciona como um limitante da quantidade de dinheiro disponível (orçamento) para realizar as operações humanitárias e a otimização bi-objetivo permite analisar o impacto do aumento do orçamento no atendimento das vítimas do desastre. Assim, a partir dos testes preliminares foi selecionado o método epsilon-restrito para a otimização multiobjetivo.

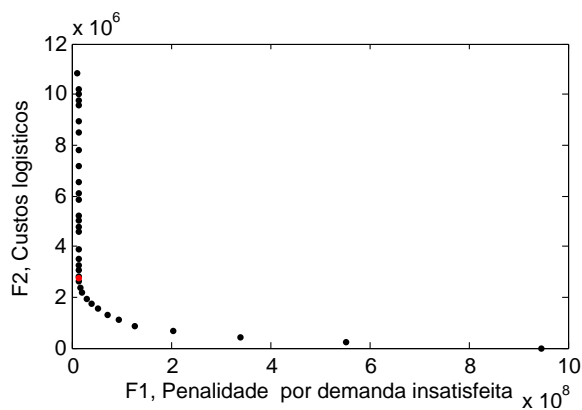
O método de otimização multiobjetivo selecionado foi aplicado para todas as instâncias de médio porte (M1-M9). Para cada uma das instâncias foram geradas $N = 51$ soluções fatíveis. O algoritmo utilizado é mostrado a seguir:

Algoritmo 5 Algoritmo do método epsilon-restrito utilizado.

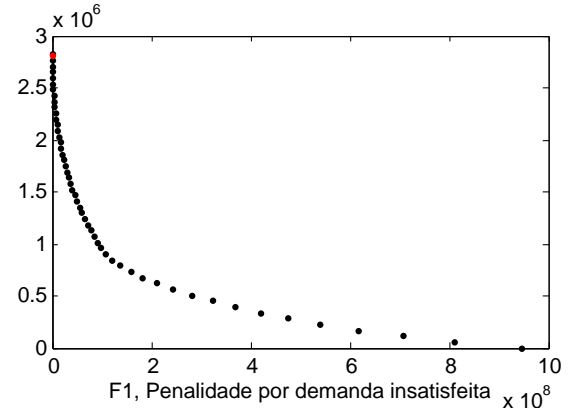
- 1: **Inicialização:** Determinar F_2^* e F_2' .
 - 2: $\Delta = \frac{F_2' - F_2^*}{N-1}$; $\sigma = F_2^*$.
 - 3: **para** $i \leftarrow 1$ **até** N **faça**
 - 4: Resolva o modelo epsilon-restrito.
 - 5: Salve solução fatível.
 - 6: $\sigma = F_2^* + \Delta$.
 - 7: **fim para**
 - 8: Excluir soluções dominadas.
-

A.5.2 Resultado da otimização bi-objetivo

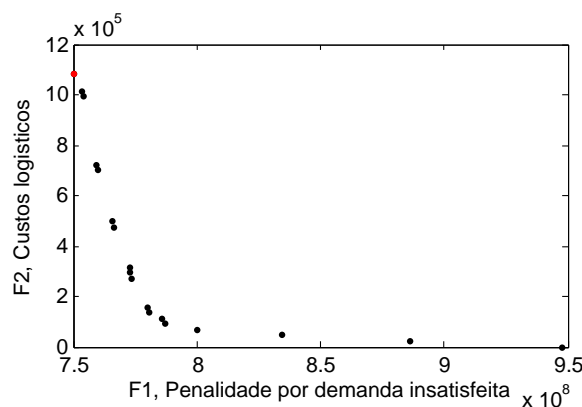
Na Figura A.2 é apresentado o conjunto Pareto-ótimo obtido para cada uma das instâncias médias (M1-M9). O eixo horizontal representa a penalidade por demanda insatisfeita e o eixo vertical representa os custos logísticos. O ponto vermelho indica a solução do modelo FRFS mono-objetivo. Como esperado, é possível observar que ao aumentar o orçamento disponível para custos logísticos diminui a penalidade por demanda insatisfeita. Note que, embora o custo logístico aumente de forma constante (de acordo com o parâmetro Δ), a penalidade por demanda insatisfeita não sofre uma diminuição constante. A diminuição na penalidade por demanda insatisfeita é menor a medida que o orçamento é mais alto, de fato, para algumas instâncias existe um ponto no qual a diminuição da penalidade começa a ser quase imperceptível.



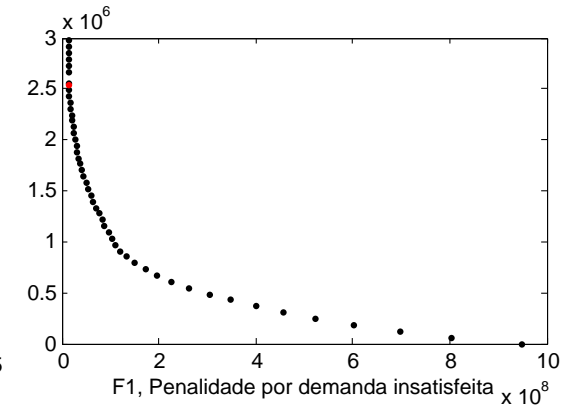
(a) Conjunto Pareto-ótimo instância M1.



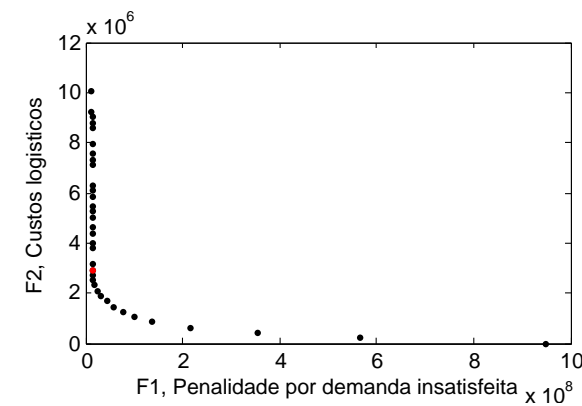
(b) Conjunto Pareto-ótimo instância M2.



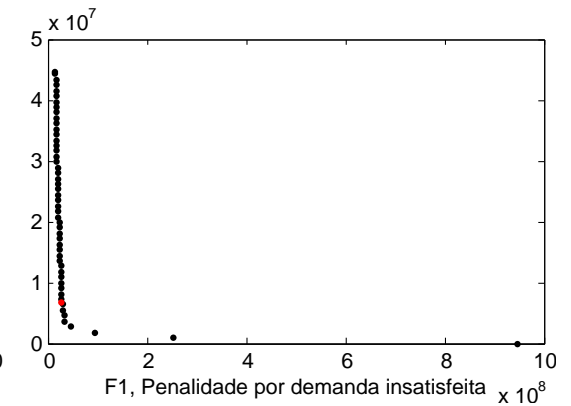
(c) Conjunto Pareto-ótimo instância M3.



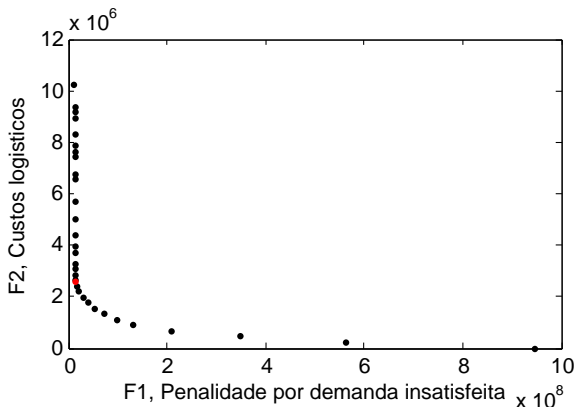
(d) Conjunto Pareto-ótimo instância M4.



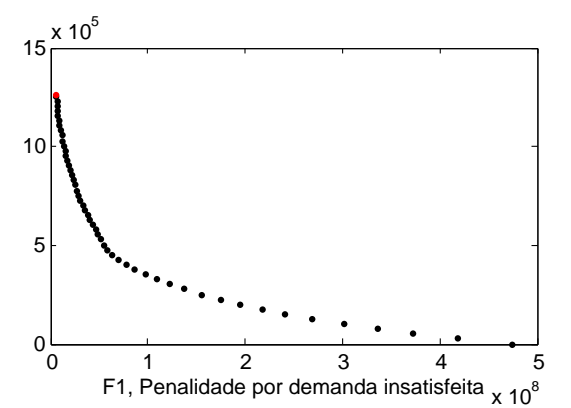
(e) Conjunto Pareto-ótimo instância M5.



(f) Conjunto Pareto-ótimo instância M6.



(g) Conjunto Pareto-ótimo instância M7.



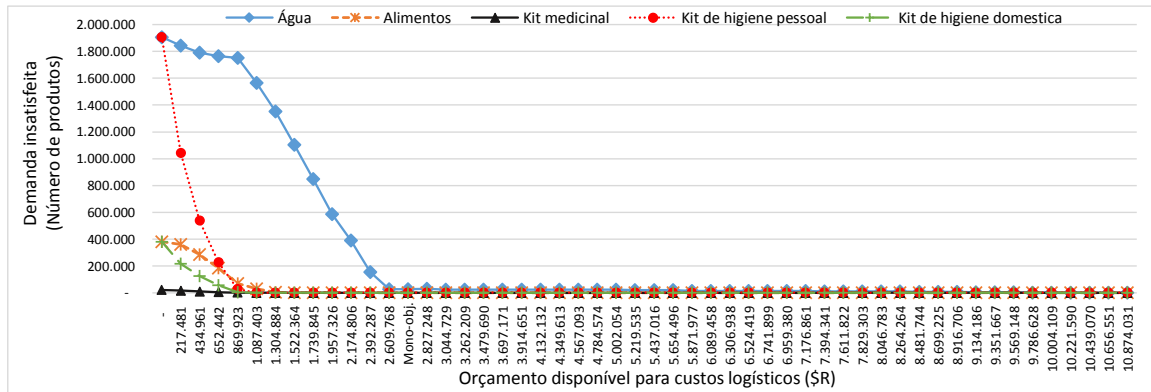
(h) Conjunto Pareto-ótimo instância M9.

Figura A.2: Conjunto Pareto-ótimo para as instâncias médias.

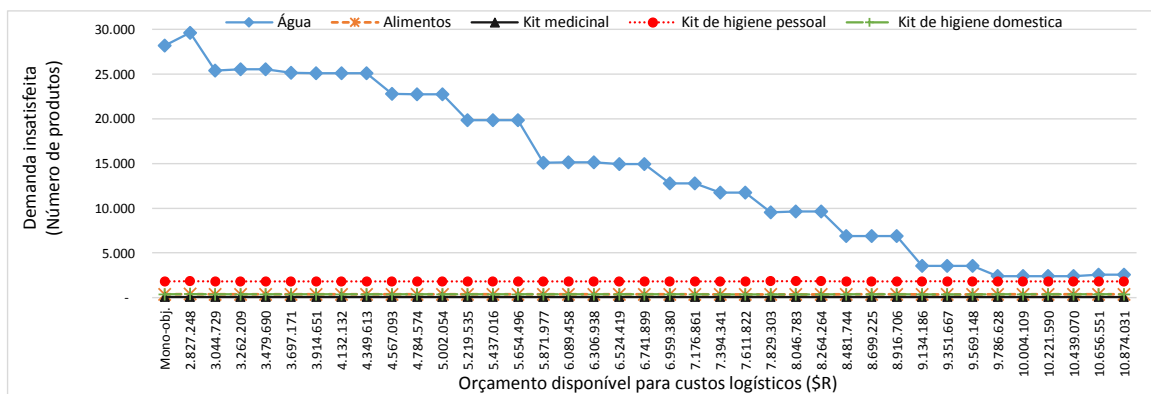
Em relação à solução mono-objetivo observam-se dois comportamentos que dependem dos custos logísticos associados a cada instância. Para algumas instâncias com custos logísticos mais altos (M1 com $F_2 < 12 \cdot 10^6$, M5 com $F_2 < 12 \cdot 10^6$, M6 com $F_2 < 5 \cdot 10^7$, M7 com $F_2 < 12 \cdot 10^6$) a solução mono-objetivo encontra-se entre os pontos nos quais a diminuição da penalidade por demanda insatisfeita torna-se quase que insignificante a medida que aumentam os custos logísticos de forma constante. A partir desses pontos, o aumento nos custos logísticos é maior do que a diminuição na penalidade por demanda insatisfeita e, portanto, não existe um ganho significativo na função mono-objetivo ao aumentar os custos. Para outras instâncias (M2 com $F_2 < 3 \cdot 10^6$, M3 com $F_2 < 12 \cdot 10^5$, M4 com $F_2 < 3 \cdot 10^6$, M9 com $F_2 < 15 \cdot 10^5$) a solução mono-objetivo está entre as soluções que apresentam a mais baixa penalidade por demanda insatisfeita. Nessas instâncias, dado que os custos logísticos são menores, quase sempre o aumento nos custos logísticos implica uma diminuição maior na penalidade por demanda insatisfeita e, portanto, existe um ganho significativo na função mono-objetivo ao aumentar esses custos até atingir uma penalidade próxima ou igual à menor penalidade possível.

Para as instâncias M2, M3, M4 e M9 o modelo bi-objetivo apresenta soluções que são, do ponto de vista do nível de serviço, tão boas quanto as soluções do modelo mono-objetivo. Por outro lado, para as instâncias M1, M5, M6 e M7 o modelo bi-objetivo apresenta soluções que melhoram o atendimento às vítimas da solução mono-objetivo. Embora essa melhoria no atendimento às vítimas não seja significativa, pois a penalidade por demanda insatisfeita diminui muito pouco em relação ao custo logístico, no contexto prático essa diminuição na penalidade pode significar o atendimento de milhares de vítimas, como pode ser observado na Figura A.3. A Figura A.3(a) apresenta o atraso de produtos para cada um dos níveis de orçamento definidos na otimização bi-objetivo. Note que, de acordo com a Figura A.3(a), até o ponto da solução mono-objetivo (Mono-obj.) a diminuição na quantidade de produtos atrasados é significativa. A partir desse ponto, “aparentemente” não existe ganho no atendimento à demanda. Porém, de acordo com a Figura A.3(b), em que é apresentado o atraso de produtos a partir da solução mono-objetivo (Mono-obj.), nota-se que existe de fato um ganho significativo na entrega do produto água. O atraso passa de aproximadamente 28.000 unidades com a solução mono-objetivo para menos de 3.000 unidades em algumas soluções não dominadas da otimização bi-objetivo. Um comportamento similar é apresentado nas demais instâncias.

Nesses gráficos é possível observar que a medida que aumenta o orçamento disponível para custos logísticos é priorizada a entrega de produtos de menor volume e maior penalidade. Dessa forma, o atraso de produtos com uma penalidade alta e volume relativamente baixo (como medicamentos e kits de higiene pessoal) diminui de uma forma mais acelerada do que produtos



(a) Atraso de produtos na instância M1.



(b) Atraso de produtos na instância M1 a partir da solução mono-objetivo.

Figura A.3: Gráfico da quantidade de produtos atrasados versus custos logísticos.

com menor penalidade a medida que aumenta o orçamento. Isso explica o fato da diminuição da penalidade por demanda insatisfeita não se manter constante a medida que aumentam os custos logísticos, pois inicialmente são distribuídos produtos com maior penalidade e menor volume e depois produtos de menor penalidade e maior volume.

A Tabela A.7 apresenta o resultado do número de veículos contratados de cada tipo (caminhões, barcos, helicópteros), o número de centros de auxílios abertos (c. aux.), o número de produtos estocados e o nível de serviço (N. de serv.) para os diferentes níveis de orçamento na otimização bi-objetivo da instância M1.

Basicamente o comportamento das decisões de contratação de veículos, abertura de centros de auxílio e estoque de produtos foi similar em todas as instâncias. Como esperado, o número total de veículos contratados, o número de centros de auxílio abertos e o nível de serviço aumentam a medida que existe um maior orçamento disponível para custos logísticos. Os veículos mais utilizados são os caminhões, pois são os que apresentam um melhor *trade-off* entre custo e capacidade. Quando o orçamento é baixo, só são utilizados caminhões para realizar a distribuição de produtos. A medida que o orçamento aumenta, veículos como barcos e helicópteros são

Tabela A.7: Resultados da otimização multi-objetivo para instância M1.

Orçamento	Custo	Penalidade	Veículos contratados				C. aux.	Estoques	N. de serv.
			Cam.	Bar.	Hel.	Total			
-	-	947.700.286	-	-	-	-	-	-	-
217.481	217.481	553.322.729	547	-	-	547	4	-	24,28
434.961	434.961	341.543.372	1.158	-	-	1.158	6	-	40,10
652.442	652.442	204.373.228	1.781	-	-	1.781	6	-	51,29
869.923	869.923	127.707.268	2.381	-	-	2.381	6	-	59,62
1.087.403	1.087.403	96.388.881	3.007	-	-	3.007	7	-	65,19
1.304.884	1.304.884	73.548.091	3.648	-	-	3.648	7	-	70,45
1.522.364	1.522.364	53.983.273	4.283	-	-	4.283	7	-	75,94
1.739.845	1.739.845	39.653.986	4.923	-	-	4.923	7	401	81,50
1.957.326	1.957.326	29.334.262	5.576	-	-	5.576	7	86	87,18
2.174.806	2.174.806	21.861.098	6.107	-	-	6.107	8	80.723	91,42
2.392.287	2.392.287	16.345.988	6.712	-	-	6.712	8	100.036	96,60
2.609.768	2.609.768	14.689.743	7.033	191	-	7.224	9	133.702	99,38
Mono-obj.	2.726.621	14.554.736	7.013	423	-	7.436	11	141.447	99,33
2.827.248	2.827.248	14.484.436	6.990	613	-	7.603	13	137.186	99,30
3.044.729	3.044.729	14.288.202	6.962	977	8	7.947	12	133.050	99,39
3.262.209	3.262.209	14.279.317	6.962	977	8	7.947	12	135.163	99,39
3.479.690	3.376.608	14.279.317	6.962	977	8	7.947	12	135.275	99,39
3.697.171	3.697.171	14.129.579	6.926	992	87	8.005	12	132.969	99,40
3.914.651	3.914.651	14.114.656	6.926	992	87	8.005	12	133.862	99,40
4.132.132	4.066.713	14.114.656	6.926	992	87	8.005	12	136.574	99,40
4.349.613	4.054.079	14.114.656	6.926	992	87	8.005	12	136.017	99,40
4.567.093	4.567.093	13.996.352	6.882	998	192	8.072	11	119.404	99,45
4.784.574	4.784.574	13.996.231	6.882	998	192	8.072	11	120.008	99,45
5.002.054	4.979.036	13.996.231	6.882	998	192	8.072	11	120.008	99,45
5.219.535	5.219.535	13.857.811	6.856	1.015	271	8.142	12	107.118	99,51
5.437.016	5.437.016	13.857.811	6.856	1.015	271	8.142	12	107.118	99,51
5.654.496	5.556.933	13.857.811	6.856	1.015	271	8.142	12	107.118	99,51
5.871.977	5.871.977	13.733.334	6.821	1.000	354	8.175	12	85.564	99,61
6.089.458	6.089.458	13.733.293	6.821	1.000	354	8.175	12	85.609	99,61
6.306.938	6.279.570	13.733.293	6.821	1.000	354	8.175	12	85.629	99,61
6.524.419	6.524.419	13.638.868	6.800	1.121	433	8.354	12	81.463	99,62
6.741.899	6.741.899	13.638.868	6.800	1.121	433	8.354	12	81.463	99,62
6.959.380	6.959.380	13.567.884	6.772	1.121	485	8.378	13	74.902	99,66
7.176.861	7.176.861	13.567.884	6.772	1.121	485	8.378	13	74.902	99,66
7.394.341	7.394.341	13.485.913	6.754	1.121	540	8.415	11	67.372	99,69
7.611.822	7.611.822	13.485.696	6.754	1.121	540	8.415	11	68.105	99,69
7.829.303	7.829.303	13.384.190	6.736	1.121	592	8.449	12	57.972	99,73
8.046.783	8.046.783	13.382.131	6.736	1.121	592	8.449	12	59.985	99,73
8.264.264	8.193.357	13.382.131	6.736	1.121	592	8.449	12	59.985	99,73
8.481.744	8.481.744	13.266.326	6.708	1.121	673	8.502	12	45.752	99,79
8.699.225	8.699.225	13.266.326	6.708	1.121	673	8.502	12	45.752	99,79
8.916.706	8.807.516	13.266.326	6.708	1.121	673	8.502	12	45.765	99,79
9.134.186	9.134.186	13.150.164	6.675	1.121	751	8.547	13	34.012	99,87
9.351.667	9.351.667	13.150.164	6.675	1.121	751	8.547	13	34.271	99,87
9.569.148	9.471.517	13.150.164	6.675	1.121	751	8.547	13	36.802	99,87
9.786.628	9.786.628	13.015.218	6.641	1.121	833	8.595	12	22.075	99,89
10.004.109	10.004.109	13.015.218	6.641	1.121	833	8.595	12	22.075	99,89
10.221.590	10.064.345	13.015.218	6.641	1.121	833	8.595	12	22.075	99,89
10.439.070	10.170.521	13.015.218	6.641	1.121	833	8.595	12	22.075	99,89
10.656.551	10.656.551	12.911.331	6.592	1.121	933	8.646	11	7.133	99,89
10.874.031	10.874.031	12.910.209	6.592	1.121	933	8.646	11	8.591	99,89

contratados para o atendimento de rotas que não podem ser atravessadas pelos caminhões. Em alguns casos, além disso, os helicópteros e barcos substituem os caminhões em algumas rotas, portanto, é observada uma tendência de diminuição no número de caminhões contratados quando veículos como barcos e helicópteros começam a ser utilizados.

Para a maioria das instâncias o estoque de produtos é nulo quando se tem um orçamento baixo, pois nessas situações o número de veículos disponíveis é apenas suficiente para realizar a distribuição da demanda de um período. A medida que o orçamento aumenta mais veículos são contratados e é possível transportar, além dos produtos que devem ser utilizados no período, produtos para estocar para os períodos seguintes. Assim, o estoque começa a aumentar, principalmente com o objetivo de aproveitar toda a capacidade dos veículos disponíveis. Finalmente, quando o orçamento é alto o suficiente e não é uma preocupação a disponibilidade de veículos, a tendência é a uma diminuição nos produtos estocados. Nesses casos, aproveitar ao máximo a capacidade dos veículos não é mais uma prioridade e o estoque de produtos é realizado apenas com o objetivo de cobrir a falta de produtos em períodos futuros. Do ponto de vista do atendimento às vítimas, é preferível não estocar produtos se não for necessário, principalmente em situações nas que os suprimentos desses produtos são limitados (lembrando que parte dos produtos estocados ficam inutilizáveis de um período para o seguinte). Vemos que em instâncias em que a disponibilidade dos suprimentos são muito maiores do que a demanda (instância M2) não existe uma limitação apertada dos suprimentos, portanto, a perda de produtos nos estoques não é tão relevante e o estoque de produtos aumenta de forma contínua ao aumentar o orçamento disponível. O nível de serviço, de forma similar ao comportamento da penalidade por demanda insatisfeita, sofre mudanças menores a medida que aumenta o orçamento para custos logísticos.

Na instâncias M3 os veículos não são suficiente para o atendimento da demanda, mesmo com um alto orçamento. Nessa instância o nível de serviço é baixo e não existem muitas mudanças nas decisões de contratação, abertura de centros de auxílio e estoque a medida que aumenta o orçamento.

A.6 Testes de otimização em paralelo

Testes computacionais adicionais foram realizados com o objetivo de explorar a otimização em paralelo (*parallel mode*, *parallel threads*) disponível no *solver* CPLEX. Tal opção utiliza os núcleos (*cores*) do computador disponíveis para serem utilizados pelo *solver* CPLEX para melhorar o rendimento do método de solução. No método *branch-and-cut*, a otimização em paralelo é aplicada na seleção das variáveis para ramificação e na resolução dos subproblemas no nó raiz e nos nós da árvore utilizando diferentes algoritmos nos diferentes núcleos (ILOG, 2014). A otimização em

paralelo foi testada em modo “oportunista”. Tal estratégia nem sempre gera a mesma solução (e tempo computacional) após o processo de otimização. Essa característica advém das diferenças no tempo dedicado a cada estratégia testada e/ou na ordem em que as mesmas são executadas nos núcleos da máquina. Somente as estratégias CPX1 (*default*) e CPX15 (melhor estratégia CPLEX) foram testadas utilizando otimização em paralelo, as quais foram denominadas CPX1P e CPX15P, respectivamente. A Tabela A.8 mostra os resultados em média das estratégias CPX1P e CPX15P. Como esperado, a otimização em paralelo melhorou o rendimento da estratégia CPX1, mas obteve soluções similares para a estratégia CPX15, pois em CPX15, vários parâmetros do *solver* CPLEX estão fixos e há menos flexibilidade na exploração de outros métodos de solução nos diferentes núcleos. Para o modelo FRFS, só houve melhoria com a estratégia CPX1P em custo e tempo. O custo médio passou de 1.356.173.850 com CPX1 para 374.654.436 com CPX1P, uma redução de 72,37%. O tempo médio passou de 1.290 com CPX1 para 1.059 com CPX1P, uma redução de 17,91%. Para o modelo FRFST, só houve melhoria com a estratégia CPX1P em tempo computacional. O tempo médio passou de 2.404 com CPX1 para 2.112 com CPX1P, uma redução de 12,14%.

Tabela A.8: Valores médios dos resultados das estratégias CPX1, CPX15, CPX1P e CPX15P.

Modelo	Estratégia	Função objetivo (R\$)	Tempo (seg.)	GAP (%)
Modelo FRFS	CPX1P	374.654.436	1.059	6,922
	CPX1	1.356.173.850	1.290	29,53
	CPX15P	207.208.984	647,4	0,7079
	CPX15	206.387.307	654,2	0,6087
Modelo FRFST	CPX1P	1.274.510.135	2.112	33,62
	CPX1	1.275.826.204	2.404	40,6
	CPX15P	1.274.528.935	1.575	33,68
	CPX15	1.274.516.192	1.586	33,58

Apêndice B

MODELO FRFSMP

A seguir encontra-se uma apresentação resumida do modelo FRFSMP:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{j \in \mathcal{J}} \alpha_j^{oper} \cdot Y_j^{oper} + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \beta_l \cdot N_{il} + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \beta'_l \cdot N'_{ilt}(\xi) + \\ & \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \gamma_{ijl} \cdot V_{ijl\tau}(\xi) + \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \delta_{kj} \cdot Z_{wkjt}(\xi) + \\ & \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \phi_w^+ \cdot I_{wjt}^{rc}(\xi) + \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \phi_w^- \cdot U_{wjt}(\xi). \end{aligned} \quad (3.1)$$

s.a.:

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} P_{wijkl(\tau - \ell_{ijl})}(\xi) + \rho_{wjt}(\xi) \cdot I_{wj(t-1)}^{rc}(\xi) = \sum_{k \in \mathcal{K}} Z_{wkjt}(\xi) + I_{wj(t-1)}^{rc}(\xi),$$

$$\forall w \in \mathcal{W}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.2)$$

$$U_{wkt}(\xi) = d_{wkt}(\xi) - \sum_{j \in \mathcal{J}} Z_{wkjt}(\xi) + U_{wk(t-1)}(\xi), \forall w \in \mathcal{W}, k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.3)$$

$$q_{wit}(\xi) + I_{wi(t-1)}^d(\xi) = \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} P_{wijkl\tau}(\xi) + I_{wit}^d(\xi), \forall w \in \mathcal{W}, i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.4)$$

$$\sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} b_w \cdot P_{wijkl(\tau - \ell_{ijl})}(\xi) + \sum_{w \in \mathcal{W}} b_w \cdot I_{wj(t-1)}^{rc}(\xi) \leq k_j^c \cdot Y_j^{oper},$$

$$\forall j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} P_{wijkl(\tau - \ell_{ijl})}(\xi) + I_{wj(t-1)}^{rc}(\xi) \leq k_{wj}^{cp} \cdot Y_j^{oper}, \forall w \in \mathcal{W}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.6)$$

$$V_{ijl\tau}(\xi) \geq \frac{\sum_{w \in \mathcal{W}} b_w \cdot P_{wijkl\tau}(\xi)}{k_l^v}, \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \tau \in \Gamma, \xi \in \Xi. \quad (3.7)$$

$$V_{ijl\tau}(\xi) \geq \frac{\sum_{w \in \mathcal{W}} b'_w \cdot P_{wijkl\tau}(\xi)}{k_l^v}, \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \tau \in \Gamma, \xi \in \Xi. \quad (3.8)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{\tau' = \tau - (2\ell_{ijl} - 1)}^{\tau} V_{ijl\tau'}(\xi) \leq N_{li} + N'_{lit}(\xi), \forall i \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{L}, \tau \in \Gamma(t), t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.9)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} N_{il} \leq k_l^n, \forall l \in \mathcal{L}. \quad (3.10)$$

$$\sum_{\tau' = \tau - (2\ell_{ijl} - 1)}^{\tau} V_{ijl\tau'}(\xi) \leq k_{ijl}^{arc} \cdot u_{ijlt}(\xi), \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \tau \in \Gamma(t), t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.11)$$

$$\mathbf{Y}^{oper} \in \mathbb{B}^{|\mathcal{J}|}. \quad (3.12)$$

$$\mathbf{N} \in \mathbb{R}^+. \quad (3.13)$$

$$\mathbf{V}(\xi) \in \mathbb{Z}^+, \forall \xi \in \Xi. \quad (3.14)$$

$$\mathbf{N}'(\xi), \mathbf{P}(\xi), \mathbf{Z}(\xi), \mathbf{I}^{rc}(\xi), \mathbf{U}(\xi), \mathbf{I}^d(\xi) \in \mathbb{R}^+, \forall \xi \in \Xi. \quad (3.15)$$

Apêndice C

MODELO FRFSDC

A seguir encontra-se uma apresentação resumida do modelo FRFSDC:

$$\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{j \in \mathcal{J}} \alpha_j^{oper} \cdot Y_j^{oper} + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \beta_l \cdot N_{il} + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \beta'_l \cdot N'_{ilt}(\xi) + \\
& \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \gamma_{ijl} \cdot V_{ijl\tau}(\xi) + \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\tau \in \Gamma} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \delta_{kj} \cdot Z'_{wkjt\tau}(\xi) + \\
& \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \phi_w^+ \cdot I_{wj}^{rc}(\xi) + \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{\delta \in \Delta_w} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot (g_w(\delta) - g_w(\delta - 1)) \cdot U'_{w\delta}(\xi) + \\
& \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{\xi \in \Xi} \pi(\xi) \cdot \max\{g_w(|\Delta_w|) - g_w(|\Gamma| - f'_t), 0\} \cdot \bar{U}_{wkt|\Gamma|} \quad (3.16)
\end{aligned}$$

s.a.:

$$q_{wit}(\xi) + I_{wi}^d(\xi) = \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} P_{wijl\tau}(\xi) + I_{wit}^d(\xi), \quad \forall w \in \mathcal{W}, i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.4)$$

$$\sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} b_w \cdot P_{wijl(\tau - \ell_{ijl})}(\xi) + \sum_{w \in \mathcal{W}} b_w \cdot I_{wj}^{rc}(\xi) \leq k_j^c \cdot Y_j^{oper}, \quad \forall j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} P_{wijl(\tau - \ell_{ijl})}(\xi) + I_{wj}^{rc}(\xi) \leq k_{wj}^{cp} \cdot Y_j^{oper}, \quad \forall w \in \mathcal{W}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.6)$$

$$V_{ijl\tau}(\xi) \geq \frac{\sum_{w \in \mathcal{W}} b_w \cdot P_{wijl\tau}(\xi)}{k_l^v}, \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \tau \in \Gamma, \xi \in \Xi. \quad (3.7)$$

$$V_{ijl\tau}(\xi) \geq \frac{\sum_{w \in \mathcal{W}} b'_w \cdot P_{wijl\tau}(\xi)}{k'_l{}^v}, \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \tau \in \Gamma, \xi \in \Xi. \quad (3.8)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{\tau' = \tau - (2\ell_{ijl} - 1)}^{\tau} V_{ijl\tau'}(\xi) \leq N_{il} + N'_{ilt}(\xi), \quad \forall i \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{L}, \tau \in \Gamma(t), t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.9)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} N_{il} \leq k_l^n, \quad \forall l \in \mathcal{L}. \quad (3.11)$$

$$\sum_{\tau' = \tau - (2\ell_{ijl} - 1)}^{\tau} V_{ijl\tau'}(\xi) \leq k_{ijl}^{arc} \cdot u_{ijlt}(\xi), \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, l \in \mathcal{L}, \tau \in \Gamma(t), t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.10)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} P_{wijkl(\tau - \ell_{ijl})}(\xi) + \rho_{wjt}(\xi) \cdot I_{wj}^{rc}(t-1)(\xi) = \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} \sum_{t'=1}^t Z'_{wkjt'\tau}(\xi) + I_{wj}^{rc}(\xi),$$

$$\forall w \in \mathcal{W}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.17)$$

$$\bar{U}_{wkt(f_{t+1})}(\xi) = d_{wkt}(\xi) - \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{\tau \in \Gamma(t)} Z'_{wkjt\tau}(\xi), \quad \forall w \in \mathcal{W}, k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, \xi \in \Xi. \quad (3.18)$$

$$\bar{U}_{wkt\tau}(\xi) = \bar{U}_{wkt(\tau-1)}(\xi) - \sum_{j \in \mathcal{J}} Z'_{wkjt\tau}(\xi),$$

$$\forall w \in \mathcal{W}, k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, \tau \in \Gamma' : f_{(t+1)} + 1 \leq \tau \leq f'_t + |\Delta_w|, \xi \in \Xi. \quad (3.19)$$

$$U'_{w\delta}(\xi) = \sum_{\substack{t \in \mathcal{T}: \\ f'_t + \delta \neq |\Gamma'|}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \bar{U}_{wkt(f'_t + \delta)}(\xi), \quad \forall w \in \mathcal{W}, \delta \in \Delta_w, \xi \in \Xi. \quad (3.20)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{\tau' = f_t}^{\tau} \sum_{t'=1}^t Z'_{wkjt'\tau'}(\xi) \leq \rho_{wjt}(\xi) \cdot I_{wj}^{rc}(t-1)(\xi) + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{\tau' = f_t}^{\tau} P_{wijkl(\tau' - \ell_{ijl})}(\xi),$$

$$\forall w \in \mathcal{W}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}, \tau \in \Gamma(t), \xi \in \Xi. \quad (3.21)$$

$$\mathbf{Y}^{oper} \in \mathbb{B}^{|\mathcal{J}|}. \quad (3.12)$$

$$\mathbf{N} \in \mathbb{R}^+. \quad (3.13)$$

$$\mathbf{V}(\xi) \in \mathbb{Z}^+, \forall \xi \in \Xi. \quad (3.14)$$

$$\mathbf{N}'(\xi), \mathbf{P}(\xi), \mathbf{Z}'(\xi), \mathbf{I}^{rc}(\xi), \bar{\mathbf{U}}(\xi), \mathbf{U}'(\xi), \mathbf{I}^d(\xi) \in \mathbb{R}^+, \forall \xi \in \Xi. \quad (3.22)$$

Apêndice D

DESCRIÇÃO DOS DADOS

As Tabelas a seguir correspondem a dados do megadesastre na Região Serrana do Rio de Janeiro em Janeiro de 2011, utilizados para a geração de instâncias no presente trabalho.

Tabela D.1: Cidades afetadas consideradas.

Áreas afetadas	Sigla
Teresópolis	TRS
Petrópolis	PTP
Nova Friburgo	NFR
São José do vale do Rio Preto	SJV
Bom Jardim	BJD
Sumidouro	SMD
Areal	ARE
Santa Maria Madalena	SMM
Sapucaia	SPC
São Sebastião do Alto	SSA

Tabela D.2: Conjunto de depósitos considerados.

Cidade	Depósitos
Teresópolis	1- Igreja Santo Antônio / Cruz Vermelha
	2- Galpão do Meudon
	3- Loja Maçônica Três Luz
	4- Ginásio Poliesportivo Pedro Jahara
Petrópolis	5- 15 Grupamento de Bombeiros Militar
Nova Friburgo	6- Sede da Cruz Vermelha de Nova Friburgo

D.1 Classificação de desastres

Em Eshghi e Larson (2008) foi realizada uma revisão sob o impacto de desastres em 105 anos (1990-2005) e desenvolvida uma nova classificação dos desastres que se baseia no número de vítimas fatais x e afetados totais y . Para cada desastre é definido um número único Ψ que

Tabela D.3: Características dos centros de auxílios considerados.

Tipo	Número total	Custo de abertura ¹	Custo de operação ²	Volume médio (L)	Volume (L)
Pequeno	17	200	300	1.030.732	$U(530.732, 1.530.732)$
Médio	16	200	600	11.558.932	$U(6.558.932, 16.558.932)$
Grande	7	200	1000	22.087.132	$U(17.087.132, 27.087.132)$

¹ Custos em reais (BRL).

² Custos em reais por dia (BRL/dia).

Tabela D.4: Características dos produtos considerados.

Tipo de produto	Volume (L)	Peso (Kg)	Quantidade por afetado	Preço de compra ¹	Custo estoque ²	Custo atraso ²
Água (15 Litros)	15	15	1	7,50	1,88	75,00
Cesta básica de alimentos	30	23	1/5	86,10	21,53	861,00
Kit medicinal	11	14	1/90	85,20	21,30	852,00
Kit de higiene pessoal	10	3	1	27,03	6,76	270,30
Kit de higiene doméstica	16	7	1/5	60,27	15,07	602,70

¹ Custos em reais por unidade (BRL/unidade).

² Custos em reais por unidade por dia (BRL/unidade).

Tabela D.5: Características dos veículos considerados

Tipo de veículo	Custo de aluguel ^{1,2}	Custo combustível (BRL/L) ³	Consumo combustível (Km/L)	Velocidade (Km/hora)	Capacidade (volume L)	Capacidade ⁴ (Peso Kg)
Caminhão	328	3,12	2,5	30	30.000	6.000
Barco	500	3,12	1,44	30	3.000	600
Helicóptero	11905	1,72	1,30	220	115.000	2.250

¹ Custos em reais por dia (BRL/dia)

² Valores consultados em: RIC (2013), Infonavis (2014), Gera (2014).

³ Valores consultados em: Confaz (2014).

⁴ Valores consultados em: guidotrc (2013), aerodinamica (2013), nupdec (2013).

quantifica o tamanho do seu impacto sobre as populações, de acordo com:

$$\Psi = \max\left[\left(\frac{x - L_x}{U_x}\right) + \log L_x, \left(\frac{y - L_y}{U_y}\right) + (\log L_y) - 1\right] \quad (\text{D.1})$$

em que L_x e L_y são limitantes inferiores para o número de vítimas fatais e para o número de afetados, definidos na Tabela D.6. Similarmente, U_x e U_y são limitantes superiores para o número de vítimas fatais e para o número de afetados, definidos na Tabela D.6. Uma vez calculado o valor de Ψ , o desastre é classificado de acordo com a Tabela D.7.

Tabela D.6: Limites inferiores e superiores para o número de vítimas e afetados.

x	L_x	U_x	y	L_y	U_y
$10 < x \leq 100$	10	100	$100 < y \leq 1.000$	100	1.000
$100 < x \leq 1.000$	100	1.000	$1.000 < y \leq 10.000$	1.000	10.000
$1.000 < x \leq 10.000$	1.000	10.000	$10.000 < y \leq 100.000$	10.000	100.000
$10.000 < x \leq 100.000$	10.000	100.000	$100.000 < y \leq 1.000.000$	100.000	1.000.000
$100.000 < x$	100.000	1.000.000	$1.000.000 < y$	1.000.000	10.000.000

Tabela D.7: Classificação dos desastres.

Φ	Tipo de desastre
$1 \leq \Phi < 2$	Situação de emergência
$2 \leq \Phi < 3$	Situação de crise
$3 \leq \Phi < 4$	Desastre menor
$4 \leq \Phi < 5$	Desastre moderado
$5 \leq \Phi < 6$	Desastre maior
6	Catástrofe

D.2 Geração de cenários

A partir dos dados na Tabela 5.1 foi utilizado o método Bootstrap para definir as probabilidade de ocorrência de cada um dos tipos de desastres. O método Bootstrap (EFRON, 1979) baseia-se na amostragem aleatória e não requer o conhecimento prévio da função de distribuição dos dados para a estimação de parâmetros da população.

Foram gerados um conjunto de $B = 1000$ amostras aleatórias de 13 dados cada uma, a partir de amostragem com repetição do número de afetados da amostra original (Tabela 5.1), e calculada a frequência relativa e o valor médio de afetados de cada tipo de desastres para cada amostra $b = 1, \dots, |B|$. Finalmente, a frequência relativa bootstrap e o número médio de afetados bootstrap para cada tipo de desastre foi calculado da seguinte maneira:

$$freq_{bp}^a = \frac{\sum_b freq_b^a}{B}, \forall a \in A. \quad (\text{D.2})$$

$$afetados_{bp}^a = \frac{\sum_b afetados_b^a}{B}, \forall a \in A. \quad (\text{D.3})$$

em que $freq_{bp}^a$ e $afetados_{bp}^a$ é a frequência relativa bootstrap e o número médio de afetados bootstrap do tipo de desastre $a \in A$, com $A = \{ \text{emergência, crise, desastre menor, desastre moderado, desastre maior} \}$; $freq_b^a$ é a frequência relativa do desastre tipo a na amostra b ; $afetados_b^a$ é o número médio de afetados do tipo de desastre a na amostra b .

Apêndice E

RESULTADOS

COMPUTACIONAIS DO MODELO

FRFSMP

Nesta seção são apresentados os valores extremos das curvas de perfis de desempenho e os resultados computacionais das melhores estratégias aplicadas na solução do modelo FRFSMP.

A Tabela a continuação apresenta os valores extremos das curvas de perfis de desempenho (valor $P(f, q)$ quando $q = 0$ e valor q quando $P(f, q) = 1$) das estratégias testadas para resolver o modelo FRFSMP.

Tabela E.1: Valores extremos das curvas de perfis de desempenho.

Figura	Estratégia	Função objetivo		Tempo computacional	
		$P(f, q)^*$	q^{**}	$P(f, q)^*$	q^{**}
Perfis de desempenho da Figura 5.2	CPX1	0,4333	5,710	0,6667	3,049
	CPX2	0,3667	10,77	0,6333	2,684
	CPX3	0,3333	10,77	0,6333	3,429
	CPX4	0,5333	0,0200	0,6333	1,978
	CPX5	0,5333	0,0171	0,6333	1,978
	CPX6	0,3667	0,0178	0,6333	1,040
	CPX7	0,3667	0,0161	0,6333	1,230
	CPX8	0,4000	0,0256	0,6333	1,096
	CPX9	0,3667	0,0377	0,6333	1,407
	CPX10	0,4000	0,0369	0,6333	1,124
	CPX11	0,3667	0,0203	0,6333	0,7112
	CPX12	0,4000	0,0206	0,6333	1,338
	CPX13	0,5000	0,0184	0,7000	0,6978
	CPX14	0,4667	0,0371	0,7000	1,867
	CPX15	0,3667	0,0424	0,6667	0,4867
	CPX16	0,3333	0,2623	0,7000	1,557
	CPX17	0,3333	0,2623	0,7333	0,9868
Perfis de desempenho da Figura 5.3	RFX1	0,1000	2,235	0,1000	2,193
	RFX2	0,0500	2,746	–	1,950
	RFX3	0,4500	0,1563	0,2500	2,193
	RFX4	0,4000	2,298	0,2000	1,908
	RFX5	0,0500	1,719	0,1000	2,590
	RFX6	0,0500	2,177	0,3500	3,298
Perfis de desempenho da Figura 5.4	FXO1	0,0333	2,937	0,1000	7,912
	FXO2	0,4667	1,734	0,0333	7,118
	FXO3	0,2667	4,284	0,0333	8,060
	FXO4	0,4667	4,284	0,0667	8,436
	FXO5	0,0333	3,324	0,2000	4,419
	FXO6	0,0333	3,324	0,0667	4,733
	FXO7	0,1333	4,061	0,7000	0,8525

* Valor $P(f, q)$ quando $q = 0$.

** Valor q quando $P(f, q) = 1$.

Nota: Melhores estratégias em **gap** e tempo computacional.

A Tabela E.2 a seguir apresenta o resultado das estratégias CPX1 (*default*) e CPX15 (Melhor estratégia CPLEX) aplicadas a todas as instâncias do modelo FRFSMP.

Tabela E.2: Resultado de CPX1 (*default*) e CPX15 (Melhor estratégia CPLEX) para o modelo FRFSMP.

Instância	CPX1			CPX15		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)
S1	28.321	3.600	6,289	28.321	3.600	6,289
S2	16.538	3.600	13,65	16.538	3.600	13,65
S3	28.321	3.600	6,289	28.321	3.600	6,289
S4	9.157.627	272,9	0,1699	9.152.337	46,02	0,1122
S5	28.321	3.600	6,289	28.321	3.600	6,289
S6	29.465	3.600	5,027	29.465	3.600	5,027
S7	30.121	3.600	7,502	30.121	3.600	7,502
S8	31.316	3.600	2,874	31.316	3.600	2,874
S9	17.945	3.600	14,05	17.945	3.600	14,05
S10	28.321	3.600	5,639	28.321	3.600	5,639
M1	13.553.120	1.462	0,8846	13.497.296	819,1	0,4747
M2	541.541	3.407	0,7839	557.692	3.600	3,657
M3	13.567.874	2.490	0,0928	13.659.646	654,4	0,7641
M4	947.095.099	3.600	98,10	18.109.182	1.419	0,4572
M5	13.606.010	1.616	0,9951	13.516.346	790,3	0,3384
M6	13.841.010	3.316	0,5661	13.843.948	616,9	0,5872
M7	13.585.803	1.504	0,9834	13.530.385	630,3	0,5779
M8	14.378.524	1.640	0,4885	14.381.205	691,9	0,5070
M9	6.756.763	2.726	0,3730	6.769.683	1.111	0,5632
M10	13.776.243	1.532	0,5620	13.806.961	560,2	0,7832
L1	4.055.065.427	3.600	99,85	4.055.065.427	3.600	99,85
L2	4.055.065.427	3.600	99,98	4.055.065.427	3.600	99,98
L3	4.055.065.427	3.600	44,32	4.055.065.427	3.600	44,32
L4	4.003.229.300	3.600	97,07	4.003.229.300	3.600	97,07
L5	4.073.387.427	3.600	99,85	4.073.387.427	3.600	99,85
L6	4.073.387.427	3.600	99,84	4.073.387.427	3.600	99,84
L7	4.073.387.427	3.600	99,85	4.073.387.427	3.600	99,85
L8	4.073.387.427	3.600	99,81	4.073.387.427	3.600	99,81
L9	2.045.854.713	3.600	99,86	2.045.854.713	3.600	99,86
L10	4.073.387.427	3.600	99,84	4.073.387.427	3.600	99,84
Média	1.321.377.190	3.066	37,06	1.290.409.359	2.645	33,89

A Tabela E.3 apresentada a continuação mostra o resultado da heurística DHIS aplicada a todas as instâncias do modelo FRFSMP.

Tabela E.3: Resultado da heurística DHIS para o modelo FRFSMP.

Instância	DHIS		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)
S1	56.226	0,2800	52,80
S2	44.183	0,3280	67,68
S3	70.174	0,3590	62,18
S4	10.873.741	1,655	15,93
S5	61.144	0,2810	56,59
S6	69.965	0,3740	60,00
S7	69.814	0,3270	60,09
S8	68.954	0,3430	55,89
S9	43.732	0,3580	64,73
S10	59.110	0,3120	54,79
M1	14.689.995	7,706	8,555
M2	1.661.619	5,070	67,66
M3	14.997.814	7,785	9,618
M4	20.134.094	23,62	10,47
M5	14.679.566	11,73	8,236
M6	15.674.797	9,329	12,20
M7	14.643.960	11,56	8,138
M8	15.686.153	13,40	8,784
M9	7.647.460	6,443	11,98
M10	26.241.463	7,254	47,80
L1	10.350.654	1,747	43,01
L2	5.000.723	1,747	79,94
L3	2.418.448.996	1,395	6,634
L4	125.128.192	257,5	6,149
L5	10.349.315	1,112	42,67
L6	12.057.982	1,783	46,55
L7	10.298.679	1,519	42,65
L8	28.860.973	754,0	73,77
L9	5.649.885	690,1	47,85
L10	47.773.467	910,3	86,06
Média	94.379.761	400,7	40,65

A Tabela E.4 apresentada a continuação mostra o resultado das estratégias RFX3 (melhor estratégia *relax-and-fix*) e DHIS+RFX3 (heurística híbrida RFX3 com DHIS) aplicadas a todas as instâncias do modelo FRFSMP.

Tabela E.4: Resultado de RFX3 e DHIS+RFX3 para o modelo FRFSMP.

Instância	RFX3			DHIS+RFX3		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)
S1	28.321	3.600	6,289	30.899	1.501	14,11
S2	17.352	2.485	17,70	17.363	1.002	17,75
S3	29.320	2.414	9,482	28.540	1.501	7,008
S4	9.209.655	89,26	0,7339	9.337.399	139,1	2,092
S5	28.321	3.600	6,289	29.509	1.014	10,06
S6	30.061	3.600	6,911	32.023	1.501	12,61
S7	33.162	2.421	15,98	33.381	1.002	16,53
S8	31.316	3.600	2,874	31.365	1.501	3,023
S9	19.074	3.600	19,14	20.200	1.501	23,64
S10	28.341	2.440	5,704	28.321	1.028	5,639
M1	13.785.571	794,8	2,556	13.579.112	1.331	1,074
M2	575.421	942,0	6,626	573.057	2.509	6,240
M3	15.219.270	868,0	10,93	13.799.386	1.336	1,769
M4	20.284.427	890,0	11,13	18.563.793	3.600	2,895
M5	13.692.205	546,0	1,618	13.553.879	1.175	0,6143
M6	14.140.523	770,1	2,672	13.866.975	1.090	0,7523
M7	15.084.114	882,1	10,82	13.591.923	1.232	1,028
M8	14.588.837	505,1	1,923	14.650.740	1.966	2,337
M9	6.808.123	373,1	1,125	6.798.593	1.492	0,9860
M10	13.815.666	324,5	0,8458	13.847.289	1.215	1,072
L1	4.055.065.427	3.600	99,85	9.999.157	3.600	41,00
L2	3.987.503.730	3.600	99,97	4.882.400	3.600	79,46
L3	4.043.582.791	3.600	44,16	2.399.484.759	3.600	5,896
L4	3.982.593.234	3.600	97,05	123.234.528	3.600	4,707
L5	4.055.065.427	3.600	99,85	10.297.426	3.600	42,38
L6	4.055.065.427	3.600	99,84	12.016.427	3.600	46,36
L7	4.055.065.427	3.600	99,85	10.124.834	3.600	41,66
L8	4.055.065.427	3.600	99,81	28.596.152	3.600	73,53
L9	1.993.751.865	3.600	99,85	5.578.897	3.600	47,19
L10	4.055.065.427	3.600	99,84	39.881.935	3.600	83,31
Média	1.282.509.109	2.358	36,05	92.550.342	2.154	19,89

A Tabela E.5 apresentada a continuação mostra o resultado das estratégias FXO2 (melhor estratégia *fix-and-optimize*) e DHIS+FXO2 (heurística híbrida FXO2 com DHIS) aplicadas a todas as instâncias do modelo FRFSMP.

Tabela E.5: Resultado de FXO2 e DHIS+FXO2 para o modelo FRFSMP.

Instância	FXO2			DHIS+FXO2		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)
S1	29.074	1.443	8,715	30.359	114,6	12,58
S2	18.992	49,03	24,81	19.464	104,4	26,63
S3	31.044	1.127	14,51	32.386	391,8	18,05
S4	9.707.326	29,45	5,823	9.329.968	25,63	2,014
S5	29.071	1.167	8,705	29.691	446,0	10,61
S6	33.835	1.384	17,29	33.764	247,2	17,12
S7	30.836	1.101	9,647	31.722	95,93	12,17
S8	34.976	211	13,04	35.572	136,2	14,49
S9	17.964	1.444	14,14	18.478	474,1	16,53
S10	34.091	10,72	21,61	34.611	559,4	22,79
M1	13.884.476	299,0	3,250	14.168.898	134,5	5,192
M2	621.479	378,1	13,55	631.198	441,9	14,88
M3	14.859.766	571,3	8,779	14.243.749	164,8	4,833
M4	20.463.592	1.249	11,91	18.707.284	714,5	3,640
M5	13.871.676	338,8	2,891	14.262.725	133,3	5,554
M6	14.179.180	387,3	2,938	14.178.745	133,4	2,935
M7	13.878.321	336,5	3,070	14.077.859	142,3	4,444
M8	15.401.357	424,3	7,097	15.144.381	147,7	5,521
M9	7.036.161	303,8	4,329	7.074.168	130,8	4,843
M10	15.409.231	349,8	11,10	15.061.531	654,1	9,048
L1	826.309.748	3.600	99,29	10.273.386	3.600	42,58
L2	692.471.692	3.600	99,86	4.789.680	3.600	79,06
L3	4.237.203.676	3.600	46,71	2.346.244.144	3.600	3,760
L4	3.984.907.317	3.600	97,05	125.128.192	3.600	6,149
L5	529.677.226	3.600	98,88	10.203.512	3.600	41,85
L6	926.508.928	3.600	99,30	11.890.675	3.600	45,79
L7	859.241.170	3.600	99,31	10.018.146	3.600	41,04
L8	4.148.718.993	3.600	99,82	28.860.973	3.600	73,77
L9	2.028.924.656	3.600	99,85	5.649.885	3.600	47,85
L10	445.224.627	3.600	98,50	47.345.874	3.600	85,94
Média	627.292.016	1.620	38,19	91.251.701	1.380	22,72

A Tabela E.6 apresentada a continuação mostra o resultado das estratégias FXO7 (melhor estratégia *fix-and-optimize*) e DHIS+FXO7 (heurística híbrida FXO7 com DHIS) aplicadas a todas as instâncias do modelo FRFSMP.

Tabela E.6: Resultado de FXO7 e DHIS+FXO7 para o modelo FRFSMP.

Instância	FXO7			DHIS+FXO7		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)
S1	96.896	16,62	72,61	38.400	6,941	30,88
S2	45.580	13,17	68,67	25.208	7,255	43,35
S3	92.958	17,92	71,45	36.897	5,725	28,07
S4	24.223.963	31,15	62,26	9.378.958	15,29	2,526
S5	180.924	14,91	85,33	36.916	4,835	28,11
S6	117.474	15,02	76,18	42.160	4,885	33,62
S7	87.259	18,08	68,07	44.152	6,364	36,90
S8	96.646	22,57	68,53	40.068	365,7	24,09
S9	45.329	16,26	65,97	25.836	5,053	40,30
S10	101.981	14,37	73,79	46.616	4,540	42,67
M1	75.413.853	44,59	82,19	14.171.159	66,02	5,207
M2	4.204.243	121,7	87,22	628.101	309,9	14,46
M3	75.799.728	30,89	82,12	14.243.749	135,2	4,833
M4	66.227.372	1.023	72,78	18.987.052	379,9	5,060
M5	75.537.335	243,0	82,17	14.170.434	67,35	4,939
M6	74.633.248	66,94	81,56	14.678.745	99,48	6,241
M7	73.618.819	65,52	81,73	14.218.347	66,49	5,388
M8	75.850.946	59,37	81,14	15.381.510	81,86	6,977
M9	37.660.578	56,44	82,13	7.074.168	89,23	4,843
M10	75.226.072	20,45	81,79	15.607.729	266,1	12,23
L1	3.987.503.730	1.598	99,85	7.845.855	3.600	24,81
L2	3.473.960.942	3.256	99,97	2.339.180	3.600	57,13
L3	2.674.411.903	616,8	15,57	2.326.361.194	2.481	2,938
L4	3.731.387.758	3.600	96,85	122.875.663	3.600	4,428
L5	3.598.825.749	2.367	99,84	7.369.684	3.600	19,49
L6	3.521.012.237	1.165	99,82	9.423.440	3.600	31,60
L7	4.055.065.427	2.454	99,85	7.767.317	3.600	23,96
L8	4.055.065.427	841,7	99,81	15.892.847	3.600	52,37
L9	1.745.597.522	3.001	99,83	3.725.653	3.600	20,92
L10	3.599.766.598	3.400	99,82	16.611.049	3.600	59,92
Média	1.170.061.950	807,1	1,30	88.636.270	1.229	22,61

A Tabela E.7 apresentada a continuação mostra o resultado do EVPI e VSS para todas as instâncias do modelo FRFSMP.

Tabela E.7: Valores WS, RP, EEV, EVPI e VSS das instâncias testadas com o modelo FRFSMP.

Instância	WS	RP	EEV	EVPI		VSS	
				Valor	%	Valor	%
S1	27.455	28.321	29.565	866,4	3,059	1.244	4,391
S2	15.567	16.538	17.352	971,0	5,871	814	4,924
S3	27.455	28.321	29.563	866,4	3,059	1.242	4,384
S4	8.896.738	9.146.983	9.228.519	250.245	2,736	81.536	0,8914
S5	27.483	28.321	29.310	837,9	2,959	988	3,489
S6	27.893	29.717	31.448	1.824	6,137	1.732	5,837
S7	29.647	30.121	33.182	474,7	1,576	3.061	10,16
S8	28.614	31.316	32.889	2.703	8,630	1.573	5,023
S9	17.539	17.945	20.355	405,9	2,262	2.410	13,43
S10	27.455	28.321	29.567	866,4	3,059	1.245	4,40
M1	13.221.594	13.912.754	22.361.849	691.160	4,968	8.449.094	60,73
M2	358.041	593.643	9.356.130	235.602	39,69	8.762.487	1.476,05
M3	12.884.023	13.680.396	14.563.145	796.373	5,821	882.749	6,453
M4	17.640.640	18.173.751	25.392.360	533.111	2,933	7.218.609	39,72
M5	12.478.618	13.518.369	21.805.089	1.039.751	7,691	8.286.720	61,30
M6	11.921.904	13.851.563	17.332.850	1.929.660	13,93	3.481.287	25,13
M7	12.580.360	13.532.043	21.945.041	951.684	7,033	8.412.997	62,17
M8	11.927.994	14.819.986	22.896.250	2.891.992	19,51	8.076.264	54,50
M9	4.185.673	6.766.601	6.960.430	2.580.928	38,14	193.829	2,864
M10	12.815.258	13.804.587	22.276.255	989.329	7,167	8.471.669	61,37
L1	6.463.195	6.805.092	25.083.885	341.898	5,024	18.278.793	268,6
L2	1.144.005	1.696.942	19.083.415	552.938	32,58	17.386.473	1.024,58
L3	2.276.841.151	2.299.504.121	2.349.756.101	22.662.970	0,9856	50.251.980	2,185
L4	121.587.847	124.219.432	134.080.479	2.631.585	2,118	9.861.047	7,938
L5	6.276.942	6.951.320	29.321.523	674.378	9,701	22.370.203	321,81
L6	7.092.974	8.021.615	24.276.827	928.642	11,58	16.255.212	202,64
L7	6.465.837	7.000.699	24.933.293	534.862	7,640	17.932.594	256,15
L8	6.941.702	12.499.674	25.211.379	5.557.972	44,46	12.711.705	101,70
L9	3.456.737	5.765.328	21.163.685	2.308.590	40,04	15.398.357	267,09
L10	9.655.018	10.083.819	26.148.330	428.801	4,252	16.064.511	159,31
Média	85.502.179	87.152.921	95.781.002	1.650.743	11,49	8.628.081	150,64

Apêndice F

RESULTADOS

COMPUTACIONAIS DO MODELO

FRFSDC

Nesta seção são apresentados os resultados computacionais das melhores estratégias aplicadas na solução do modelo FRFSDC.

Tabela F.1: Resultado de CPX1 (*default*) e CPX15 (Melhor estratégia CPLEX) para o modelo FRFSDC.

Instância	CPX1			CPX15		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)
S1	838.291.955	74,40	0,0013	838.292.447	37,13	0,0014
S2	303.509.232	61,14	0,0039	303.570.848	25,68	0,0242
S3	838.349.716	73,70	0,0082	838.291.842	34,48	0,0013
S4	40.840.171.208	398,8	0,0021	41.093.010.487	207,2	0,6174
S5	838.309.310	60,50	0,0034	838.291.804	31,40	0,0013
S6	838.293.016	56,35	0,0013	838.293.794	27,33	0,0013
S7	838.322.980	69,19	0,0050	838.299.128	35,51	0,0022
S8	838.296.488	49,16	0,0015	838.305.103	28,55	0,0025
S9	419.159.895	78,52	0,0046	419.159.853	34,07	0,0046
S10	838.447.530	54,60	0,0199	838.292.139	29,59	0,0014
M1	1.251.003.016.932	3.600	99,79	1.251.003.016.932	3.600	99,79
M2	1.251.003.016.932	3.600	99,96	1.251.003.016.932	3.600	99,96
M3	1.251.003.016.932	3.600	99,79	1.251.003.016.932	3.600	99,79
M4	1.250.276.836.594	3.600	98,19	1.250.276.836.594	3.600	98,19
M5	1.251.003.016.932	3.600	99,79	1.251.012.177.932	3.600	99,79
M6	1.251.003.016.932	3.600	99,79	1.251.003.016.932	3.600	99,79
M7	1.251.003.016.932	3.600	99,79	1.251.012.177.932	3.600	99,79
M8	1.251.003.016.932	3.600	99,79	1.251.012.177.932	3.600	99,79
M9	625.501.508.466	3.600	99,79	625.510.669.466	3.600	99,79
M10	1.251.003.016.932	3.600	99,79	1.251.012.177.932	3.600	99,79
Média	596.561.681.593	1.849	49,83	596.576.604.648	1.825	49,86

Tabela F.2: Resultado da heurística DHIS para o modelo FRFSDC.

DHIS			
Instância	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)
S1	838.319.408	1,107	0,0046
S2	303.534.333	1,077	0,0122
S3	838.330.201	1,046	0,0059
S4	44.245.091.366	8,892	7,698
S5	838.322.345	1,108	0,0050
S6	838.330.702	1,046	0,0057
S7	838.332.435	1,108	0,0061
S8	838.326.094	1,108	0,0050
S9	419.171.731	1,015	0,0074
S10	838.320.275	1,107	0,0048
M1	2.603.161.360	63,17	0,0448
M2	453.575.155	33,09	0,2914
M3	2.603.472.494	64,84	0,0567
M4	22.680.356.732	3.600	0,0092
M5	2.603.349.321	65,91	0,0520
M6	2.604.192.940	97,75	0,0691
M7	2.603.275.339	80,26	0,0339
M8	2.604.808.859	172,2	0,0928
M9	1.302.062.834	51,23	0,0821
M10	2.616.615.592	71,39	0,5377
Média	4.675.547.476	215,9	0,4512

Tabela F.3: Resultado de RFX3 e DHIS+RFX3 para o modelo FRFSDC.

Instância	RFX3			DHIS+RFX3		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)
S1	845.605.851	84,57	0,8662	838.308.704	41,92	0,0033
S2	303.511.682	49,03	0,0047	303.518.412	36,10	0,0069
S3	838.293.426	79,26	0,0015	838.300.505	42,67	0,0024
S4	41.310.862.076	2.326	1,141	42.402.166.794	968,0	3,686
S5	838.300.475	89,70	0,0024	838.302.508	38,44	0,0026
S6	838.292.160	69,26	0,0012	838.298.539	42,25	0,0019
S7	838.317.642	96,58	0,0044	838.310.865	42,86	0,0036
S8	838.291.437	62,70	0,0009	838.318.527	44,18	0,0041
S9	419.159.533	89,00	0,0045	419.162.400	38,88	0,0052
S10	838.297.169	74,30	0,0020	838.298.447	40,34	0,0022
M1	111.549.509.321	3.600	97,67	2.602.836.501	3.249	0,0323
M2	111.551.036.598	3.600	99,59	452.836.887	3.471	0,1288
M3	111.742.204.849	3.600	97,67	2.602.326.831	3.222	0,0127
M4	1.250.276.836.594	3.600	98,19	22.680.356.732	3.600	0,0092
M5	111.551.083.702	3.600	97,67	2.602.071.921	3.331	0,0029
M6	111.549.904.174	3.600	97,67	2.604.137.411	3.316	0,0670
M7	111.549.577.562	3.600	97,67	2.602.869.586	3.335	0,0183
M8	111.550.844.184	3.600	97,67	2.603.992.699	3.450	0,0614
M9	55.774.811.388	3.600	97,67	1.301.909.456	3.423	0,0704
M10	111.550.062.476	3.600	97,67	2.612.746.858	3.169	0,3904
Média	112.327.740.115	1.951	49,06	4.582.953.529	1.745	0,2256

Tabela F.4: Resultado de FXO2 e DHIS+FXO2 para o modelo FRFSDC.

Instância	FXO2			DHIS+FXO2		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)
S1	838.297.699	24,17	0,0020	838.301.494	17,27	0,0025
S2	303.511.672	22,60	0,0047	303.518.336	16,93	0,0069
S3	838.295.063	25,35	0,0017	838.298.134	17,85	0,0021
S4	51.068.143.561	133,7	20,03	41.114.522.611	147,0	0,6694
S5	838.294.630	21,33	0,0017	838.312.621	15,03	0,0038
S6	838.442.737	22,31	0,0191	838.310.896	17,19	0,0034
S7	838.374.110	21,34	0,0111	838.315.139	14,87	0,0041
S8	838.324.313	20,70	0,0048	838.308.171	15,82	0,0029
S9	419.162.095	20,59	0,0051	419.159.002	17,01	0,0044
S10	838.300.729	19,50	0,0024	838.303.405	16,43	0,0027
M1	2.612.279.031	2.790	0,3937	2.603.117.974	1.339	0,0431
M2	458.347.216	2.793	1,329	452.841.658	1.013	0,1299
M3	2.615.176.432	2.888	0,5040	2.602.792.164	1.502	0,0306
M4	1.250.267.675.594	3.600	98,19	22.680.356.732	3.600	0,0092
M5	2.615.883.197	3.600	0,5309	2.602.784.524	1.302	0,0303
M6	2.613.662.099	3.007	0,4312	2.603.265.132	1.397	0,0335
M7	2.622.307.695	2.855	0,7594	2.602.823.703	1.409	0,0166
M8	2.611.851.608	3.279	0,3622	2.603.899.686	1.641	0,0579
M9	1.301.268.202	3.172	0,0211	1.301.479.597	1.263	0,0374
M10	2.611.176.373	3.600	0,3305	2.610.160.952	1.402	0,2917
Média	66.399.438.703	1.596	6,147	4.518.443.597	808,2	0,0691

Tabela F.5: Resultado de FXO7 e DHIS+FXO7 para o modelo FRFSDC.

Instância	FXO7			DHIS+FXO7		
	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)
S1	861.224.642	10,50	2,664	838.308.526	13,46	0,0033
S2	312.570.783	11,51	2,903	303.518.039	13,54	0,0068
S3	838.635.880	18,69	0,0424	838.311.816	13,15	0,0037
S4	50.752.834.730	81,45	19,53	41.544.057.932	125,7	1,6964
S5	861.223.908	9,968	2,664	838.306.714	13,51	0,0031
S6	846.281.616	10,56	0,9452	838.316.886	13,78	0,0041
S7	861.207.624	9,454	2,662	838.318.547	13,36	0,0045
S8	868.641.254	9,017	3,495	838.315.830	13,54	0,0038
S9	430.763.154	9,499	2,698	419.159.720	14,29	0,0046
S10	862.326.547	9,081	2,789	838.311.593	13,62	0,0037
M1	407.659.767.849	478,4	99,36	2.602.807.092	850,1	0,0312
M2	260.059.082.272	671,8	99,83	452.841.658	1.013	0,1299
M3	381.820.890.356	201,4	99,32	2.603.408.565	727,0	0,0543
M4	1.250.270.000.000	3.499	98,19	22.680.356.732	3.600	0,0092
M5	407.844.122.037	532,1	99,36	2.602.767.674	838,6	0,0297
M6	407.654.285.928	652,1	99,36	2.603.607.164	893,8	0,0466
M7	407.687.209.539	634,2	99,36	2.602.819.849	878,1	0,0164
M8	1.060.600.000.000	326,2	99,75	2.604.171.352	1.040	0,0683
M9	195.772.355.908	489,3	99,34	1.301.644.136	825,9	0,0500
M10	408.091.000.000	375,9	99,36	2.612.924.755	904,9	0,3972
Média	262.247.721.201	402,0	51,68	4.540.113.729	590,9	0,1283

Tabela F.6: Soluções do modelo FRFSDC obtidas a partir do modelo FRFSMP.

Instância	Função objetivo (R\$)	Tempo (Seg.)	GAP (%)
S1	838.289.013	0,3120	0,0010
S2	303.507.446	0,2660	0,0033
S3	838.286.545	0,2500	0,0007
S4	138.942.247.995	1,248	70,61
S5	838.286.545	0,2340	0,0007
S6	838.287.940	0,2810	0,0006
S7	838.288.345	0,2190	0,0009
S8	838.289.540	0,2500	0,0007
S9	419.147.056	0,2500	0,0015
S10	838.286.545	0,2340	0,0007
M1	2.607.092.254	5,023	0,1955
M2	452.451.267	4,945	0,0437
M3	5.089.624.782	5,257	48,88
M4	22.801.924.972	308,5	0,5423
M5	2.607.559.673	5,351	0,2134
M6	2.666.907.014	4,929	2,419
M7	2.604.142.312	4,961	0,0672
M8	16.512.733.016	4,882	84,24
M9	1.303.087.035	4,867	0,1607
M10	5.108.855.135	4,899	49,06
L1	4.905.093.386	515,7	59,28
L2	1.193.532.647	456,1	39,83
L3	1.209.358.553.081	469,2	99,83
L4	2.501.630.131.431	251,0	99,92
L5	4.985.496.593	337,7	59,94
L6	4.930.977.287	346,0	59,50
L7	5.001.351.636	517,5	60,07
L8	5.271.543.735	721,7	62,11
L9	3.040.576.919	290,0	67,16
L10	5.403.404.055	553,7	86,71
Média	131.766.931.840	160,5	31,69

Tabela F.7: Valores WS, RP, EEV, EVPI e VSS das instâncias testadas com o modelo FRFSDC.

Instância	WS	RP	EEV	EVPI		VSS	
				Valor	%	Valor	%
S1	838.286.888	838.288.928	838.322.194	2.040,4	0,0002	33.265	0,0040
S2	303.503.323	303.504.821	303.538.424	1.498,6	0,0005	33.602	0,0111
S3	838.287.442	838.288.928	838.323.022	1.487,0	0,0002	34.093	0,0041
S4	40.839.075.263	40.839.326.251	40.850.378.813	250.988	0,0006	11.052.561	0,0271
S5	838.288.126	838.288.943	838.323.303	817	0,0001	34.360	0,0041
S6	838.287.520	838.289.227	838.303.914	1.707	0,0002	14.686	0,0018
S7	838.292.096	838.294.328	838.328.225	2.232	0,0003	33.896	0,0040
S8	838.269.050	838.289.319	900.955.173	20.269	0,0024	62.665.854	7,475
S9	419.148.360	419.148.800	419.174.425	441	0,0001	25.624	0,0061
S10	838.286.927	838.288.928	838.530.206	2.002	0,0002	241.278	0,0288
M1	2.602.974.821	2.603.381.813	2.610.867.453	406.993	0,0156	7.485.639	0,2875
M2	451.460.925	452.400.111	461.069.838	939.186	0,2076	8.669.727	1,916
M3	2.594.171.135	2.603.754.861	2.604.157.349	9.583.727	0,3681	402.488	0,0155
M4	22.683.691.005	22.889.347.306	23.091.110.270	205.656.302	0,8985	201.762.963	0,8815
M5	2.603.043.904	2.603.378.022	2.610.769.933	334.119	0,0128	7.391.911	0,2839
M6	2.603.200.521	2.608.516.611	2.610.953.314	5.316.090	0,2038	2.436.703	0,0934
M7	2.603.005.950	2.603.345.198	2.610.642.524	339.249	0,0130	7.297.325	0,2803
M8	2.603.866.957	2.604.898.952	2.611.618.630	1.031.995	0,0396	6.719.678	0,2580
M9	1.300.295.849	1.301.204.651	1.309.462.208	908.802	0,0698	8.257.557	0,6346
M10	2.602.317.575	2.602.707.487	2.611.404.032	389.913	0,0150	8.696.544	0,3341
Média	4.503.887.682	4.515.147.175	4.531.811.662	11.259.493	0,0924	16.664.488	0,6276

Apêndice G

COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS FRFSMP E FRFSDC

Nessa seção são apresentadas as tabelas com os resultados dos modelos FRFSMP, FRFSDC, FRFSMTB e FRFSDCB para todos os grupos de instâncias. Também são apresentadas as Tabelas com o valor médio, desvio padrão e pior nível de serviço por produto ($S(w)$), área afetada ($S(k)$) e cenário ($S(\xi)$) para todos os grupos de instâncias.

Tabela G.1: Resultados dos modelos FRFSMP, FRFSDC, FRFSMTB e FRFSDCB para as instâncias pequenas.

Ins- tância	Modelo	Custo total	Custo oper.	Custo de contratação 1 ^o estág.	Custo transp.	Custo estoque	Custo atend.	Penalidade demanda insat.	Veículos contratados 1 ^o estág.	Centros abertos	Estoque	Perda de prod.	Demanda insatisfeita		
													Média	Esperada	
S1	FRFSMP	28.321	1.700	4.920	1.428	—	2.258	18.016	3	—	—	—	6	7	18
	FRFSDC	838.288.929	6.600	4.920	439	—	730	838.276.240	3	3	—	—	6	7	18
	FRFSMTB	28.322	1.700	4.920	1.428	—	2.258	18.017	3	—	—	—	6	7	18
	FRFSDCB	838.291.646	9.800	4.920	475	—	210	838.276.241	3	4	—	—	6	7	18
S2	FRFSMP	16.538	1.700	4.920	1.319	—	2.265	6.334	3	1	—	—	2	3	6
	FRFSDC	303.504.822	4.900	4.920	334	—	702	303.493.966	3	2	—	—	2	3	6
	FRFSMTB	16.539	1.700	4.920	1.319	—	2.265	6.335	3	1	—	—	2	3	6
	FRFSDCB	303.506.491	6.600	4.920	336	—	689	303.493.946	3	3	—	—	2	3	6
S3	FRFSMP	28.321	1.700	4.920	1.428	—	2.258	18.016	3	—	—	—	6	7	18
	FRFSDC	838.288.929	6.600	4.920	439	—	730	838.276.240	3	3	—	—	6	7	18
	FRFSMTB	28.322	1.700	4.920	1.428	—	2.258	18.017	3	—	—	—	6	7	18
	FRFSDCB	838.288.929	6.600	4.920	439	—	730	838.276.241	3	3	—	—	6	7	18
S4	FRFSMP	9.146.983	24.600	269.680	290.111	6.551	30.149	6.668.983	112	372	8	45.420	12.147	26.074	338.964
	FRFSDC	40.839.326.252	24.600	274.600	300.272	6.327	29.486	40.836.656.641	115	407	8	16.527	3.682	25.445	330.787
	FRFSMTB	9.220.537	22.900	282.800	1.942.692	297.377	11.942	6.633.154	120	389	7	31.517	7.464	25.759	334.866
	FRFSDCB	40.839.330.790	24.600	281.160	2.032.308	300.272	6.327	29.483	40.836.656.642	119	406	8	16.527	3.682	25.445
S5	FRFSMP	28.321	1.700	4.920	1.428	—	2.258	18.016	3	—	—	—	6	7	18
	FRFSDC	838.288.943	6.600	4.920	445	—	738	838.276.240	3	3	—	—	6	7	18
	FRFSMTB	28.322	1.700	4.920	1.428	—	2.258	18.017	3	1	—	—	6	7	18
	FRFSDCB	838.288.944	6.600	4.920	445	—	738	838.276.241	3	12	—	—	6	7	18
S6	FRFSMP	29.717	4.900	4.920	990	66	825	18.016	3	2	162	26	6	7	18
	FRFSDC	838.289.227	6.600	4.920	609	7	788	838.276.303	3	3	16	6	6	7	18
	FRFSMTB	29.718	4.900	4.920	990	66	825	18.017	3	2	162	26	6	7	18
	FRFSDCB	838.289.225	6.600	4.920	607	7	790	838.276.301	3	3	16	1	6	7	18
S7	FRFSMP	30.121	3.500	4.920	1.428	—	2.258	18.016	3	—	—	—	6	7	18
	FRFSDC	838.294.329	12.000	4.920	439	—	730	838.276.240	3	3	—	—	6	7	18
	FRFSMTB	30.122	3.500	4.920	1.428	—	2.258	18.017	3	—	—	—	6	7	18
	FRFSDCB	838.289.603	3.500	6.560	1.043	—	2.259	838.276.241	4	—	—	—	6	7	18
S8	FRFSMP	31.316	4.900	6.560	741	144	956	18.016	4	—	353	55	6	7	18
	FRFSDC	838.289.319	4.900	6.560	560	—	983	838.276.316	4	2	—	—	6	7	18
	FRFSMTB	31.317	4.900	6.560	741	144	956	18.017	4	—	353	55	6	7	18
	FRFSDCB	838.289.320	4.900	6.560	560	—	985	838.276.315	4	2	—	—	6	7	18
S9	FRFSMP	17.945	1.700	4.920	1.188	—	1.129	9.008	3	1	—	—	3	4	9
	FRFSDC	419.148.801	4.900	4.920	470	—	858	419.138.152	3	2	—	—	3	4	9
	FRFSMTB	17.946	1.700	4.920	1.188	—	1.129	9.009	3	1	—	—	3	4	9
	FRFSDCB	419.148.801	4.900	4.920	470	—	858	419.138.153	3	2	—	—	3	4	9
S10	FRFSMP	28.321	1.700	4.920	1.428	—	2.258	18.016	3	—	—	—	6	7	18
	FRFSDC	838.288.929	6.600	4.920	439	—	730	838.276.240	3	3	—	—	6	7	18
	FRFSMTB	28.322	1.700	4.920	1.428	—	2.258	18.017	3	—	—	—	6	7	18
	FRFSDCB	838.288.929	6.600	4.920	439	—	730	838.276.241	3	3	—	—	6	7	18
Média	FRFSMP	938.591	4.810	31.560	30.149	676	4.661	681.044	14	37	2	4.594	1.223	2.612	33.910
	FRFSDC	4.743.000.848	8.430	32.052	203.433	633	3.597	4.742.722.258	14	41	3	1.654	368	2.549	2.550
	FRFSMTB	945.947	4.640	32.872	194.269	30.876	1.215	4.613	677.461	15	39	2	3.203	755	2.581
	FRFSDCB	4.743.001.268	8.070	32.872	203.231	633	3.697	4.742.722.256	15	41	4	1.654	368	2.549	2.550

Tabela G-2: Valor médio, desvio padrão e pior nível de serviço por produto ($S(w)$), área afetada ($S(k)$) e cenário ($S(\xi)$) para as instâncias pequenas.

Instância	Modelo	$S(w)$			$S(k)$			$S(\xi)$			$S(k, w)$		
		Média	Desvio	Mínimo	Média	Desvio	Mínimo	Média	Desvio	Mínimo	Média	Desvio	Mínimo
S1	FRFSMP	96,91	4,374	90,72	99,65	0,5963	98,47	98,21	1,373	96,67	95,00	14,47	43,75
	FRFSDC	96,91	4,374	90,72	99,52	0,5269	98,81	98,21	1,373	96,67	93,99	13,11	56,25
	FRFSMTB	96,91	4,374	90,72	99,65	0,6004	98,46	98,21	1,373	96,67	95,00	14,47	43,75
	FRFSDCB	96,91	4,374	90,72	99,48	0,6114	98,53	98,21	1,373	96,67	93,78	14,26	53,33
S2	FRFSMP	98,97	1,458	96,91	99,80	0,4082	98,98	99,45	0,3897	99,17	97,50	9,354	62,50
	FRFSDC	98,97	1,458	96,91	99,82	0,2412	99,37	99,45	0,3897	99,17	97,85	5,289	80,00
	FRFSMTB	98,97	1,458	96,91	99,79	0,4121	98,97	99,44	0,3955	99,14	97,50	9,354	62,50
	FRFSDCB	98,97	1,458	96,91	99,77	0,3141	99,20	99,45	0,3897	99,17	97,45	6,834	74,67
S3	FRFSMP	96,91	4,374	90,72	99,65	0,5963	98,47	98,21	1,373	96,67	95,00	14,47	43,75
	FRFSDC	96,91	4,374	90,72	99,52	0,5269	98,81	98,21	1,373	96,67	93,99	13,11	56,25
	FRFSMTB	96,91	4,374	90,72	99,65	0,6004	98,46	98,21	1,373	96,67	95,00	14,47	43,75
	FRFSDCB	96,91	4,374	90,72	99,52	0,5269	98,81	98,21	1,373	96,67	93,99	13,11	56,25
S4	FRFSMP	90,33	8,836	78,44	79,72	11,75	60,57	95,72	7,889	69,26	90,40	13,73	52,25
	FRFSDC	90,51	8,588	78,99	86,15	12,15	61,02	95,80	7,743	69,77	93,03	12,65	52,79
	FRFSMTB	90,42	8,712	78,71	77,25	12,88	61,63	95,76	7,825	69,47	89,49	15,34	53,53
	FRFSDCB	90,51	8,588	78,99	86,15	12,16	61,02	95,80	7,743	69,77	93,06	12,66	52,79
S5	FRFSMP	96,91	4,374	90,72	99,65	0,5963	98,47	98,21	1,373	96,67	95,00	14,47	43,75
	FRFSDC	96,91	4,374	90,72	99,52	0,5269	98,81	98,21	1,373	96,67	93,99	13,11	56,25
	FRFSMTB	96,91	4,374	90,72	99,65	0,5979	98,47	98,20	1,373	96,67	95,00	14,47	43,75
	FRFSDCB	96,91	4,374	90,72	99,52	0,5314	98,79	98,21	1,373	96,67	93,97	13,22	55,69
S6	FRFSMP	96,91	4,374	90,72	99,31	0,8469	98,11	98,21	1,373	96,67	92,25	19,77	40,00
	FRFSDC	96,91	4,374	90,72	99,48	0,6078	98,53	98,21	1,373	96,67	93,68	14,24	53,33
	FRFSMTB	96,91	4,374	90,72	99,31	0,8469	98,11	98,21	1,373	96,67	92,25	19,77	40,00
	FRFSDCB	96,91	4,374	90,72	99,49	0,5824	98,74	98,21	1,373	96,67	93,75	14,06	56,25
S7	FRFSMP	96,91	4,374	90,72	99,65	0,5963	98,47	98,21	1,373	96,67	95,00	14,47	43,75
	FRFSDC	96,91	4,374	90,72	99,52	0,5269	98,81	98,21	1,373	96,67	93,99	13,11	56,25
	FRFSMTB	96,91	4,374	90,72	99,65	0,6001	98,46	98,20	1,382	96,64	95,00	14,47	43,75
	FRFSDCB	96,91	4,374	90,72	99,56	0,4860	98,80	98,21	1,373	96,67	94,33	12,43	55,83
S8	FRFSMP	96,91	4,374	90,72	99,31	0,8469	98,11	98,21	1,373	96,67	92,25	19,77	40,00
	FRFSDC	96,91	4,374	90,72	99,48	0,6078	98,53	98,21	1,373	96,67	93,66	14,29	53,33
	FRFSMTB	96,91	4,374	90,72	99,31	0,8469	98,11	98,21	1,373	96,67	92,25	19,77	40,00
	FRFSDCB	96,91	4,374	90,72	99,48	0,6078	98,53	98,21	1,373	96,67	93,66	14,29	53,33
S9	FRFSMP	96,91	4,374	90,72	99,65	0,5963	98,47	98,21	1,373	96,67	97,50	7,23	71,88
	FRFSDC	96,91	4,374	90,72	99,51	0,5419	98,74	98,21	1,373	96,67	97,00	6,52	80,00
	FRFSMTB	96,91	4,374	90,72	99,65	0,6045	98,45	98,21	1,372	96,67	97,50	7,23	71,88
	FRFSDCB	96,91	4,374	90,72	99,51	0,5419	98,74	98,21	1,373	96,67	97,00	6,52	80,00
S10	FRFSMP	96,91	4,374	90,72	99,65	0,5963	98,47	98,21	1,373	96,67	95,00	14,47	43,75
	FRFSDC	96,91	4,374	90,72	99,48	0,5810	98,74	98,21	1,373	96,67	93,69	14,09	56,25
	FRFSMTB	96,91	4,374	90,72	99,65	0,6001	98,46	98,20	1,382	96,64	95,00	14,47	43,75
	FRFSDCB	96,91	4,374	90,72	99,48	0,5810	98,74	98,21	1,373	96,67	93,69	14,09	56,25
Média	FRFSMP	96,46	4,528	90,11	97,60	1,7431	94,66	98,08	1,926	94,18	94,49	14,22	48,54
	FRFSDC	96,47	4,504	90,17	98,20	1,6841	95,02	98,09	1,911	94,23	94,49	11,95	60,07
	FRFSMTB	96,46	4,516	90,14	97,36	1,8585	94,76	98,08	1,922	94,19	94,40	14,38	48,67
	FRFSDCB	96,47	4,504	90,17	98,20	1,6938	94,99	98,09	1,911	94,23	94,47	12,15	59,44

Melhores valores em **negrito**.

Tabela G-3: Resultados dos modelos FRFSMP, FRFSDC, FRFSMTB e FRFSDCB para as instâncias médias.

Ins-tância	Modelo	Custo total	Custo oper.	Custo de contratação 1 ^o estág.	Custo transp.	Custo estoque	Custo atend.	Penalidade demanda insat.	Veículos contratados		Centros abertos	Estoque	Perda de prod.	Demanda insatisfeita		
									1 ^o estág.	2 ^o estág.				Média	Esperada	Total
M1	FRFSMP	13.502.754	60.200	828.000	9.074	49.056	105.973	12.450.452	200	3	11	—	—	890	727	4.452
	FRFSDC	2.603.381.814	90.000	328.000	1.503.022	98.551	45.549	2.601.316.692	100	458	15	—	—	890	727	4.452
	FRFSMTB	22.050.126	94.000	9.161.000	234.916	85.847	24.231	12.450.133	300	72	15	—	—	890	727	4.452
	FRFSDCB	2.603.382.314	90.000	328.000	1.503.022	98.551	46.385	2.601.316.356	100	458	15	—	—	890	727	4.452
M2	FRFSMP	593.643	47.800	328.000	—	29.517	60.736	17.579	100	—	9	210.761	45.777	3	4	14
	FRFSDC	452.400.111	47.800	328.000	—	30.602	40.944	451.768.668	100	—	9	142.080	30.719	3	4	14
	FRFSMTB	596.460	47.800	328.000	—	29.719	69.404	17.580	100	—	9	240.834	54.187	3	4	14
	FRFSDCB	452.403.065	47.800	328.000	—	30.631	40.949	451.767.590	100	—	9	142.100	30.724	3	4	14
M3	FRFSMP	13.680.396	43.800	916.100	287.343	25.325	872	12.147.746	30	88	9	1.250	281	3.422	2.676	17.112
	FRFSDC	2.603.754.862	90.000	32.800	2.171.269	98.551	—	2.601.316.692	10	662	15	—	—	890	727	4.452
	FRFSMTB	47.103.218	129.000	916.100	33.733.305	299.291	—	11.960.133	30	1.366	20	—	—	890	727	4.452
	FRFSDCB	2.605.170.382	90.000	916.100	2.249.375	98.551	2.986	2.601.316.355	30	686	15	3.346	533	890	727	4.452
M4	FRFSMP	18.173.751	65.000	4.744.510	21.698	107.230	74.662	13.053.514	246	7	10	517.632	120.311	12.238	12.238	159.097
	FRFSDC	22.889.347.307	102.800	9.161.000	3.649.892	378.050	506	22.875.922.879	300	300	17	3.508	715	12.161	12.161	158.096
	FRFSMTB	18.158.208	65.000	4.744.510	21.698	107.230	74.752	13.038.161	262	7	10	517.531	120.290	12.237	12.237	159.080
	FRFSDCB	22.894.837.813	122.800	9.161.000	8.676.038	378.050	8.346	22.875.918.487	300	476	19	21.085	3.544	12.161	12.161	158.096
M5	FRFSMP	13.518.369	66.400	828.000	11.595	56.601	107.447	12.448.327	200	4	12	—	—	890	727	4.452
	FRFSDC	2.603.378.022	83.800	328.000	1.498.721	101.261	—	2.601.320.368	100	457	14	—	—	890	727	4.452
	FRFSMTB	22.047.963	79.800	9.161.000	275.005	60.811	8	12.444.133	300	84	14	30	5	890	727	4.452
	FRFSDCB	2.603.373.943	70.400	443.000	1.391.850	99.839	—	2.601.320.042	123	424	12	—	—	890	727	4.452
M6	FRFSMP	13.851.563	60.200	2.161.280	49.907	55.254	7.944	11.341.106	216	15	11	27.567	5.852	949	772	4.744
	FRFSDC	2.608.516.612	54.000	2.327.940	44.362	51.692	16.351	2.605.842.358	218	14	10	7.294	1.083	934	779	4.672
	FRFSMTB	20.721.490	96.200	9.161.000	319.102	70.683	0	11.000.133	300	97	16	—	0	890	727	4.452
	FRFSDCB	2.619.831.966	112.600	9.161.000	93.012.691	6.204.483	—	2.511.306.964	300	2.201	18	—	—	890	727	4.452
M7	FRFSMP	13.532.043	80.000	828.000	9.074	49.003	61	12.460.132	200	3	11	19	2	890	727	4.452
	FRFSDC	2.603.345.199	117.000	328.000	1.439.236	98.836	—	2.601.316.667	100	439	15	—	—	890	727	4.452
	FRFSMTB	13.531.660	80.000	828.000	9.074	49.064	—	12.460.133	200	3	11	—	—	890	727	4.452
	FRFSDCB	2.603.345.688	117.000	328.000	1.439.236	98.836	—	2.601.316.356	100	439	15	—	—	890	727	4.452
M8	FRFSMP	14.819.986	50.000	4.077.870	181.480	26.753	61.876	10.258.621	269	55	10	214.720	45.404	15.150	11.687	75.751
	FRFSDC	2.604.898.952	90.000	328.000	2.445.770	68.921	—	2.601.841.070	100	746	15	—	—	890	727	4.452
	FRFSMTB	14.898.546	102.400	4.161.200	1.699.450	96.080	—	8.760.133	300	356	17	—	—	890	727	4.452
	FRFSDCB	2.604.899.013	90.000	328.000	2.445.770	68.921	—	2.601.840.971	100	746	15	—	—	890	727	4.452
M9	FRFSMP	6.766.601	58.000	242.720	—	26.869	—	6.370.328	74	—	10	—	—	445	364	2.226
	FRFSDC	1.301.204.651	50.800	301.760	—	33.297	1	1.300.763.435	92	—	9	2	—	445	364	2.226
	FRFSMTB	6.766.575	58.000	242.720	—	26.869	—	6.370.329	74	—	10	—	—	445	364	2.226
	FRFSDCB	1.301.200.761	50.800	301.760	—	33.585	1	1.300.762.503	92	—	9	2	—	445	364	2.226
M10	FRFSMP	13.804.587	60.200	828.000	—	49.571	24.753	12.740.515	200	—	11	85.897	18.571	3.468	2.708	17.340
	FRFSDC	2.602.707.488	76.600	723.000	—	46.883	—	2.601.734.216	179	—	13	—	—	890	727	4.452
	FRFSMTB	24.156.453	73.600	9.161.000	2.863.349	62.024	—	11.970.133	300	87	13	—	—	890	727	4.452
	FRFSDCB	2.620.334.556	76.600	9.161.000	8.840.362	46.883	2.281	2.601.733.302	300	206	13	2.726	395	890	727	4.452
Média	FRFSMP	12.224.369	59.160	1.578.248	57.017	47.518	23.090	10.328.832	174	17	10	105.785	23.620	3.835	3.263	28.964
	FRFSDC	4.287.293.520	80.280	1.418.650	1.275.227	100.664	5.780	4.284.314.304	130	308	13	15.288	3.312	1.889	1.767	19.172
	FRFSMTB	19.003.070	82.580	4.786.453	3.915.590	88.762	14.416	10.047.100	217	207	14	75.840	17.448	1.892	1.770	19.248
	FRFSDCB	4.290.877.950	86.800	3.045.586	11.955.834	715.833	5.456	4.274.859.873	155	564	14	16.926	3.520	1.884	1.762	19.150

Tabela G.4: Valor médio, desvio padrão e pior nível de serviço por produto ($S(w)$), área afetada ($S(k)$) e cenário ($S(\xi)$) para as instâncias médias.

Instância	Modelo	$S(w)$			$S(k)$			$S(\xi)$			$S(k, w)$		
		Média	Desvio	Mínimo	Média	Desvio	Mínimo	Média	Desvio	Mínimo	Média	Desvio	Mínimo
M1	FRFSMP	99,86	0,0849	99,69	99,46	0,6595	98,60	98,97	0,9216	97,60	99,26	1,274	95,60
	FRFSDC	99,86	0,0849	99,69	99,40	1,188	97,02	98,97	0,9216	97,60	99,22	1,705	92,87
	FRFSMTB	99,86	0,0849	99,69	99,43	0,6950	98,49	98,97	0,9216	97,60	99,21	1,301	95,60
	FRFSDCB	99,86	0,0849	99,69	99,40	1,188	97,02	98,97	0,9216	97,60	99,22	1,705	92,87
M2	FRFSMP	99,99	0,0262	99,93	100,00	0,0025	99,99	99,83	0,2146	99,49	99,93	0,2707	98,69
	FRFSDC	99,99	0,0262	99,93	100,00	0,0018	100,00	99,83	0,2146	99,49	99,94	0,2116	99,10
	FRFSMTB	99,99	0,0262	99,93	100,00	0,0024	99,99	99,83	0,2146	99,49	99,93	0,2682	98,71
	FRFSDCB	99,99	0,0262	99,93	100,00	0,0018	100,00	99,83	0,2146	99,49	99,94	0,2116	99,10
M3	FRFSMP	99,73	0,2562	99,24	98,80	1,937	94,95	98,71	1,029	97,60	98,97	2,028	90,80
	FRFSDC	99,86	0,0849	99,69	99,40	1,188	97,02	98,97	0,9216	97,60	99,22	1,705	92,87
	FRFSMTB	99,86	0,0849	99,69	99,43	0,6979	98,53	98,97	0,9216	97,60	99,20	1,318	94,99
	FRFSDCB	99,86	0,0849	99,69	99,80	0,2596	99,28	98,97	0,9216	97,60	99,74	0,378	98,89
M4	FRFSMP	98,21	0,1302	97,95	97,59	2,786	93,24	98,45	1,812	94,85	97,88	3,712	83,77
	FRFSDC	98,22	0,1307	97,96	97,83	1,772	96,29	98,48	1,806	94,93	98,16	2,723	91,18
	FRFSMTB	98,21	0,1303	97,95	98,75	2,187	94,39	98,48	1,806	94,93	98,43	2,505	93,44
	FRFSDCB	98,22	0,1302	97,96	98,88	0,8304	97,54	98,48	1,806	94,93	98,56	2,059	93,49
M5	FRFSMP	99,86	0,0849	99,69	99,46	0,6550	98,55	98,97	0,9216	97,60	99,28	1,308	94,99
	FRFSDC	99,86	0,0849	99,69	99,40	1,188	97,02	98,97	0,9216	97,60	99,22	1,705	92,87
	FRFSMTB	99,86	0,0849	99,69	99,43	0,7007	98,52	98,97	0,9216	97,60	99,19	1,331	94,99
	FRFSDCB	99,86	0,0849	99,69	99,50	0,6228	98,53	98,97	0,9216	97,60	99,22	1,303	94,99
M6	FRFSMP	99,83	0,0879	99,69	99,41	0,7226	98,41	98,97	0,9216	97,60	99,23	1,249	94,99
	FRFSDC	99,86	0,0852	99,69	99,40	0,7523	98,22	98,34	1,6497	95,60	99,27	1,370	94,99
	FRFSMTB	99,86	0,0849	99,69	99,48	0,6331	98,50	98,97	0,9216	97,60	99,29	1,169	95,50
	FRFSDCB	99,86	0,0849	99,69	99,42	0,7469	98,19	98,97	0,9216	97,60	99,23	0,843	97,41
M7	FRFSMP	99,86	0,0849	99,69	99,46	0,6607	98,51	98,97	0,9216	97,60	99,27	1,305	94,99
	FRFSDC	99,86	0,0849	99,69	99,40	1,188	97,02	98,97	0,9216	97,60	99,22	1,705	92,87
	FRFSMTB	99,86	0,0849	99,69	99,46	0,6550	98,56	98,97	0,9216	97,60	99,28	1,307	94,99
	FRFSDCB	99,86	0,0849	99,69	99,40	1,188	97,02	98,97	0,9216	97,60	99,22	1,705	92,87
M8	FRFSMP	99,11	1,475	96,17	94,95	8,126	78,87	98,57	0,8848	97,60	97,06	9,759	50,08
	FRFSDC	99,86	0,0849	99,69	99,40	1,188	97,02	98,97	0,9216	97,60	99,22	1,705	92,87
	FRFSMTB	99,86	0,0849	99,69	99,41	0,7365	98,29	98,97	0,9216	97,60	99,17	1,319	94,99
	FRFSDCB	99,86	0,0849	99,69	99,40	1,188	97,02	98,97	0,9216	97,60	99,22	1,705	92,87
M9	FRFSMP	99,86	0,0849	99,69	99,40	0,7979	98,01	98,97	0,9216	97,60	99,59	0,6262	97,75
	FRFSDC	99,86	0,0849	99,69	99,35	1,293	96,77	98,97	0,9216	97,60	99,57	0,8400	96,66
	FRFSMTB	99,86	0,0849	99,69	99,40	0,8251	97,91	98,97	0,9216	97,60	99,58	0,6647	97,50
	FRFSDCB	99,86	0,0849	99,69	99,36	1,235	96,89	98,97	0,9216	97,60	99,57	0,8503	96,51
M10	FRFSMP	99,73	0,2613	99,23	97,95	3,302	91,48	98,91	0,8591	97,60	98,55	3,888	80,60
	FRFSDC	99,86	0,0849	99,69	99,41	0,9484	97,55	98,97	0,9216	97,60	99,23	1,616	92,87
	FRFSMTB	99,86	0,0849	99,69	99,45	0,6851	98,43	98,97	0,9216	97,60	99,25	1,213	95,50
	FRFSDCB	99,86	0,0849	99,69	99,88	0,0866	99,73	98,97	0,9216	97,60	99,78	0,292	98,91
Média	FRFSMP	99,60	0,2576	99,10	98,65	1,965	95,06	98,93	0,9407	97,52	98,90	2,542	88,23
	FRFSDC	99,71	0,0836	99,54	99,30	1,071	97,39	98,94	1,0121	97,32	99,23	1,529	93,91
	FRFSMTB	99,71	0,0836	99,54	99,42	0,7818	98,16	99,01	0,9393	97,52	99,25	1,240	95,62
	FRFSDCB	99,71	0,0835	99,54	99,50	0,7346	98,12	99,01	0,9393	97,52	99,37	1,105	95,79

Melhores valores em **negrito**.

Tabela G.5: Resultados dos modelos FRFSMP e FRFSDC para as instâncias grandes.

Instância	Modelo	Custo total	Custo oper.	Custo de contratação		Custo transp.	Custo estoque	Custo atend.	Penalidade demanda insat.	Vef. contrat.		Cent. aber.	Estoque	Perda de prod.		Demanda insatisfeita		
				$\frac{1}{2}$ estág.	$\frac{2}{2}$ estág.					$\frac{1}{2}$ est.	$\frac{2}{2}$ est.			Média	Desvio	Média	Desvio	
L1	FRFSMP	6.805.092	316.800	656.000	455.356	100.497	46.880	200.427	5.029.132	100	117	24	373.187	96.555	99	147	495	495
	FRFSDC	4.905.093.386	316.800	656.000	455.356	100.497	46.880	205.764	4.903.312.089	100	117	24	373.187	96.555	99	147	495	495
L2	FRFSMP	1.696.942	272.200	656.000	351.275	86.707	142.181	82.422	1.06.157	100	95	21	685.144	171.327	7	10	33	33
	FRFSDC	1.193.582.647	272.200	656.000	351.275	86.707	142.181	80.339	1.191.943.946	100	95	21	685.144	171.327	7	10	33	33
L3	FRFSMP	2.315.077.821	442.000	18.322.000	361.369.801	17.229.089	92.484	94.502	1.917.527.945	300	49,684	40	58.836	26.721	1.337.688	1.028.365	6.688.440	6.688.440
	FRFSDC	121.291.123.603	442.000	18.322.000	361.369.801	12.588.307	92.484	76.181	120.898.232.831	300	49,684	40	58.836	26.721	1.337.688	1.028.365	6.688.440	6.688.440
L4	FRFSMP	124.219.432	435.800	1.386.000	2.883.476	327.332	19.997	176.265	118.907.562	173	368	39	138.527	26.789	31.877	31.877	414.403	414.403
	FRFSDC	19.812.464.210	435.800	1.386.000	2.883.476	327.332	19.997	173.051	19.807.238.554	173	368	39	138.527	26.789	31.877	31.877	414.403	414.403
L5	FRFSMP	6.951.320	298.600	656.000	479.512	103.712	21.755	199.226	5.200.060	100	121	23	261.991	71.479	100	148	498	498
	FRFSDC	4.985.496.593	298.600	656.000	479.512	103.712	21.755	197.795	4.983.739.219	100	121	23	261.991	71.479	100	148	498	498
L6	FRFSMP	8.021.615	335.400	656.000	1.305.412	147.896	41.860	254.320	5.280.727	100	358	27	227.431	53.506	109	154	543	543
	FRFSDC	4.840.977.287	335.400	656.000	1.305.412	147.896	41.860	259.009	4.838.231.711	100	358	27	227.431	53.506	109	154	543	543
L7	FRFSMP	7.000.699	346.000	656.000	448.287	102.023	50.486	202.724	5.195.180	100	114	23	313.301	77.782	124	167	622	622
	FRFSDC	5.001.351.636	346.000	656.000	448.287	102.023	50.486	210.089	4.999.538.751	100	114	23	313.301	77.782	124	167	622	622
L8	FRFSMP	12.499.674	429.800	1.656.000	3.607.663	76.176	23.536	198.842	6.507.657	200	738	39	247.937	60.618	215	241	1.073	1.073
	FRFSDC	5.271.543.735	429.800	1.656.000	3.607.663	76.176	23.536	207.843	5.265.542.716	200	738	39	247.937	60.618	215	241	1.073	1.073
L9	FRFSMP	5.765.328	318.600	656.000	2.220.901	100.136	-	57.622	2.412.068	100	650	23	-	-	276	250	1.380	1.380
	FRFSDC	3.040.576.919	318.600	656.000	2.220.901	100.136	-	60.213	3.037.221.069	100	650	23	-	-	276	250	1.380	1.380
L10	FRFSMP	10.083.819	341.800	656.000	2.455.162	85.837	48.379	299.226	6.197.414	100	54	29	804.857	223.448	99	147	496	496
	FRFSDC	5.403.404.055	341.800	656.000	2.455.162	85.837	48.379	304.438	5.399.512.439	100	54	29	804.857	223.448	99	147	496	496
Média	FRFSMP	248.254.804	353.700	1.038.230	37.557.684	1.835.941	48.756	175.743	207.244.750	112	5.230	29	311.121	80.823	137.059	106.151	710.798	710.798
	FRFSDC	17.574.556.407	353.700	2.595.600	37.557.684	1.371.862	48.756	177.472	17.532.451.332	137	5.230	29	311.121	80.823	137.059	106.151	710.798	710.798

Tabela G.6: Valor médio, desvio padrão e pior nível de serviço por produto ($S(w)$), área afetada ($S(k)$) e cenário ($S(\xi)$) para as instâncias grandes.

Instância	Modelo	$S(w)$			$S(k)$			$S(\xi)$					
		Média	Desvio	Mínimo	Média	Desvio	Mínimo	Média	Desvio	Mínimo			
L1	FRFSMP	99,98	0,0401	99,90	99,99	0,0111	99,97	98,01	2,814	93,77	99,88	0,39	98,08
	FRFSDC	99,98	0,0401	99,90	99,99	0,0077	99,98	98,01	2,814	93,77	99,89	0,37	98,20
L2	FRFSMP	100,00	0,0086	99,98	100,00	0,0016	99,99	99,86	0,196	99,53	99,97	0,16	98,88
	FRFSDC	100,00	0,0086	99,98	100,00	0,0011	100,00	99,86	0,196	99,53	99,97	0,12	99,24
L3	FRFSMP	46,22	41,26	1,980	13,56	2,487	10,00	68,18	37,48	9,435	45,11	42,03	0,0081
	FRFSDC	46,22	41,26	1,980	9,475	1,698	6,527	68,18	37,48	9,435	38,77	40,83	0,0033
L4	FRFSMP	97,64	0,2381	97,16	93,72	7,5859	79,58	96,93	2,458	93,29	95,30	6,471	75,52
	FRFSDC	97,64	0,2381	97,16	78,49	2,1166	72,77	96,93	2,458	93,29	95,06	5,663	77,91
L5	FRFSMP	99,98	0,0411	99,90	99,99	0,0109	99,97	98,01	2,811	93,78	99,88	0,3684	98,17
	FRFSDC	99,98	0,0411	99,90	99,99	0,0070	99,98	98,01	2,811	93,78	99,88	0,3807	98,16
L6	FRFSMP	99,98	0,0401	99,90	99,99	0,0204	99,93	97,90	2,960	93,65	99,88	0,3581	98,28
	FRFSDC	99,98	0,0401	99,90	99,99	0,0190	99,94	97,90	2,960	93,65	99,89	0,3556	98,31
L7	FRFSMP	99,98	0,0410	99,90	99,99	0,0155	99,95	98,01	2,812	93,78	99,88	0,4057	97,89
	FRFSDC	99,98	0,0410	99,90	99,99	0,0151	99,95	98,01	2,812	93,78	99,88	0,3916	98,08
L8	FRFSMP	99,98	0,0404	99,90	99,99	0,0158	99,96	98,03	2,759	93,72	99,87	0,3822	98,15
	FRFSDC	99,98	0,0404	99,90	99,99	0,0186	99,94	98,03	2,759	93,72	99,89	0,3573	98,31
L9	FRFSMP	99,97	0,0486	99,87	99,96	0,0549	99,83	97,89	2,730	93,78	99,92	0,2155	98,78
	FRFSDC	99,97	0,0486	99,87	99,96	0,0460	99,84	97,89	2,730	93,78	99,93	0,1919	99,02
L10	FRFSMP	99,98	0,0411	99,90	99,99	0,0112	99,97	98,01	2,811	93,78	99,88	0,4084	97,99
	FRFSDC	99,98	0,0411	99,90	99,98	0,0202	99,94	98,01	2,811	93,78	99,88	0,3688	98,25
Média	FRFSMP	94,37	4,1802	89,84	90,72	1,0214	88,92	95,08	5,983	85,85	93,96	5,118	86,18
	FRFSDC	94,37	4,1802	89,84	88,79	0,3949	87,89	95,08	5,983	85,85	93,30	4,903	86,55

Melhores valores em **negrito**.