

Liciane Carneiro Magalhães

**Distribuição de Cargas Perigosas –
Modelo de Roteirização Multiobjetivo.**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: José Eugênio Leal

Rio de Janeiro
Setembro de 2008

Liciane Carneiro Magalhães

**Distribuição de Cargas Perigosas –
Modelo de Roteirização Multiobjetivo.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Eugênio Leal

Orientador

Departamento de Engenharia de Industrial – PUC-Rio

Prof. Rodrigo Garrido

Departamento de Ingeniería de Transporte – PUC-Chile

Prof. Madiagne Diallo

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Nélío Domingues Pizzolato

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Departamento de Engenharia de Industrial – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de Setembro de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Liciane Carneiro Magalhães

Graduou-se em Engenharia de Produção Mecânica pela Universidade Federal do Ceará em 2005.

Ficha Catalográfica

Magalhães, Liciane Carneiro

Distribuição de cargas perigosas – modelo de roteirização multiobjetivo / Liciane Carneiro Magalhães; orientador: José Eugênio Leal. – 2008.

70 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia industrial – Teses. 2. Roteirização de materiais perigosos. 3. Probabilidade de acidentes. 4. Risco. 5. Consequências. 6. Programação multiobjetiva. I. Leal, José Eugênio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Aos meus pais, Fátima e Lício e
aos meus irmãos Alfredo e Lícia.

Agradecimentos

Aos orientadores José Eugênio Leal e Rodrigo Garrido, pela confiança, dedicação, disponibilidade, e sugestões. Pela contribuição em minha formação e pela oportunidade de orientação.

O co-orientador Rodrigo Garrido agradece ao National Science Foundation's grants pelo apoio aos projetos, entitled "DRU: Contending with Materiel Convergence: Optimal Control, Coordination, and Delivery of Critical Supplies to the Site of Extreme Events" (National Science Foundation CMMI-0624083); e "Characterization of the Supply Chains in the Aftermath of an Extreme Event: The Gulf Coast Experience" (NSF-CMS-SGER 0554949), nos quais o presente trabalho se insere.

A todos os funcionários do DEI e à CAPES, pelo suporte financeiro.

Ao Felipe, pelo companheirismo e, principalmente, pela paciência.

Aos meus familiares, Tia Alfinha, Gerusa, Eduardo e Mariana, por todo o apoio e carinho durante minha estada no Rio de Janeiro, o que foi fundamental para a concretização do Mestrado.

Aos meus irmãos e aos meus pais, pelo amor e carinho, pela formação que me proporcionaram e pelo apoio em todas as minhas decisões, além da confiança, e otimismo que sempre me passaram.

A todos os meus queridos amigos pela força de sempre.

Resumo

Magalhães, Liciane Carneiro; Leal, José Eugênio; Garrido, Rodrigo. **Distribuição de Cargas Perigosas-Modelo de Roteirização Multiobjetivo**. Rio, 2008. 70p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O transporte de materiais perigosos tem recebido atenção considerável nos últimos anos, despertando assim o interesse de pesquisadores em se aprofundar e desenvolver modelos matemáticos de roteirização que minimizem o risco associado a esta operação. O presente trabalho baseia-se em estudos focados em encontrar rotas que minimizam a distância total, a probabilidade de acidentes, a população potencialmente exposta, as consequências associadas aos acidentes ou uma combinação desses fatores. No entanto, ainda que uma rota possa ter uma probabilidade muito baixa de acidente, ou estar associada a uma baixa consequência esperada (custo), pode não ser correto escolher essa rota se a consequência potencial ao ocorrer um acidente seja alta. Percebe-se então, que os diferentes interesses ligados à otimização do transporte de Materiais Perigosos (MP) podem ser conflitantes entre si, obtendo assim um problema com múltiplos objetivos, no qual nem sempre é possível identificar a melhor solução, ou seja, uma alternativa que se desempenha melhor que outras, em todos os critérios. Nesse contexto, o estudo que segue apresenta um modelo multiobjetivo para a roteirização de MP, além de uma metodologia específica de resolução que permita determinar rotas que minimizam o risco de acidentes com baixas probabilidades de ocorrência, mas com altas consequências, que podem dar lugar a altos custos, tanto ao meio ambiente como à população exposta. Ao final do trabalho são feitas indicações de questões e extensões para futuras pesquisas.

Palavras-chave

Roteirização de Materiais Perigosos; Probabilidade de Acidentes; Risco; Consequências; Programação Multiobjetiva.

Abstract

Magalhães, Liciane Carneiro; Leal, José Eugênio; Garrido, Rodrigo. **Transportation of Hazardous Materials-Multiobjective Routing Model.** Rio, 2008. 70p. M.Sc. Thesis – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Hazardous materials transportation has received considerable attention in the last years. Many researchers have been developing mathematical models that minimize the risk associated to this operation. The present work is based on studies that focus routing techniques that minimize either the total distance, the expected number of accidents (fatal or not fatal), the accident probability, the residential population within a given distance from a route, or a mixture of these parameters. They work with the assumption that a route should not be chosen if the potential consequence incurred given that an accident occurs is high, even if the route has a very low probability of an accident, or a low associated expected consequence. For this reason, it is possible to observe that an important characteristic of the hazardous materials routing problem is the existence of multiple conflicting objectives. This means that a route that minimizes risk may not coincide with a route that minimizes the truck operating cost, or with a route that minimizes the risk imposed to special population categories. In this context, this research presents a multiobjective model to the Hazardous Materials Routing and also a specific solution methodology that determines routes that minimize the accident risk with low probabilities, but with high consequences, including the high cost affecting the environment and the population exposed. A number of extensions and open issues are indicated for future research.

Keywords

Hazardous Materials Routing; Accident Probability; Risk; Consequence; Multiobjective Programming.

Sumário

1. Introdução	12
1.1 Estrutura do Trabalho	14
2. Revisão Bibliográfica	15
2.1 O Risco no Transporte de Materiais Perigosos	15
3. Roteirização para Materiais Perigosos	18
3.1 Considerações Iniciais do Modelo de Roteirização	18
3.2 Modelo de Programação Fraccional Discreto para a Roteirização de Materiais Perigosos ..	21
4. Extensão do Modelo <i>PECC</i> a Múltiplos Embarques.....	23
5. Avaliação do Risco no Transporte de Materiais Perigosos	26
5.1 Estimação das Conseqüências	26
5.2 Equidade na Roteirização de Materiais Perigosos	29
5.3 Métodos de Avaliação do Risco	29
5.3.1 Equidade na distribuição do Risco	30
5.3.2 Incorporação de Graus ou Níveis de Risco	31
5.3.3 Valor Prático para a função do Risco.....	33
5.3.4 Baseline Risk	34
5.4 Aplicação Numérica	36
6. Modelo de Roteirização Multiobjetivo.....	37
6.1 Considerações gerais do modelo multiobjetivo	37
6.2 Análise Multicritério para a Roteirização para Materiais Perigosos.....	39
6.2.1 Aspectos Básicos da Análise Multicritério	39
6.2.2 Otimalidade Paretiana	40
6.2.3 Principais Enfoques Multicritérios.....	41
6.2.4 Avaliação Multicritério	42
6.2.5 Programação Multiobjetivo.....	43
6.2.6 Método das Ponderações.....	44
6.2.7 Método de Programação Compromisso	45
7. Método de Programação Multiobjetivo Aplicado a um Exemplo Numérico	50
7.1 Resolução do Modelo de Sherali <i>et al.</i>	51
7.1.1 Calibração dos Parâmetros V e η	51
7.1.2 Solução para o Modelo de Sherali <i>et al.</i>	53
7.2 Estimação das preferências.....	53
7.3 Determinação dos Atributos do Modelo Multiobjetivo	56
7.4 Determinação do Conjunto Eficiente ou Pareto Ótimo.....	60
7.5 Determinação da Alternativa Ótima	61

7.6 Experiência Computacional.....	63
8. Conclusão	64
8.1 Recomendação para Trabalhos Futuros	65
9. Referências Bibliográficas.....	67
ANEXO 1	70

Lista de Figuras

Figura 5.1: Área de Impacto sobre um arco a e conceito de λ -vizinhança.....	27
Figura 5.2: Área Potencialmente Exposta entre um para de $O-D$	27
Figura 5.3: Especificação das Zonas Geográficas	28
Figura 5.4: A vizinhança de um arco e a propagação do risco entre as zonas.	30
Figura 5.5: Grau de Risco para um dado MP h	32
Figura 5.6: A vizinhança de um arco a	34
Figura 7.1: Rede de Transporte para o exemplo numérico.	50
Figura 7.2: Distribuição de Fluxo ao resolver o Modelo de Sherali <i>et al.</i>	53

Lista de Tabelas

Tabela 7.1: Atributos para os Arcos da Rede	51
Tabela 7.2: Valores do parâmetro definido como <i>Risco</i>	51
Tabela 7.3: Valores Máximos para a Probabilidade Total de Acidente e Consequência Total Esperada.....	52
Tabela 7.4. Grau de importância de cada objetivo.	55
Tabela 7.5: Grau de importância normalizado de cada objetivo.	55
Tabela 7.6: Ponto Ideal (f_1^*) para a Esperança Condicional da Consequência e Anti-ideais para os outros atributos.	56
Tabela 7.7: Ponto Ideal (f_2^*) para a Probabilidade de ocorrer um acidente e Anti-ideais para os outros atributos.	57
Tabela 7.8: Ponto Ideal (f_3^*) para a Consequência Esperada e Anti-ideais para os outros atributos.....	58
Tabela 7.9: Ponto Ideal (f_4^*) para a Distância Percorrida e Anti-ideais para os outros atributos.	59
Tabela 7.10: Valores Ideais e Anti-Ideais para todos os atributos.	59
Tabela 7.11: Pesos para o Conjunto Eficiente mediante o Método das Ponderações	60
Tabela 7.12: Geração do Conjunto Eficiente.....	61
Tabela 7.13: Conjunto Eficiente	61
Tabela 7.14: Avaliação das Alternativas do Conjunto Eficiente Mediante o Método de Programação Compromisso.	62
Tabela 7.15: Orden de Alternativas para Diferentes Métricas	62