



**Aldo Eliades Fernández Pérez**

**Estimativa de matrizes Origem-Destino  
para veículos de carga no âmbito do  
estudo do Plano Diretor de Transporte  
Urbano da Região Metropolitana de Rio  
de Janeiro (PDTU-RMRJ)**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
graduação em Engenharia de Produção do  
Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. José Eugênio Leal

Rio de Janeiro

Março de 2014



**Aldo Eliades Fernández Pérez**

**Estimativa de matrizes Origem-Destino  
para veículos de carga no âmbito do  
estudo do Plano Diretor de Transporte  
Urbano da Região Metropolitana de Rio  
de Janeiro (PDTU-RMRJ)**

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 Industrial – PUC-Rio

**Prof. Hugo Varela Repolho**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. Fernando Luiz Cyrino Oliveira**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de Março de 2014

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

### **Aldo Eliades Fernández Pérez**

Graduou-se em Pesquisa Operacional na UNMSM (Universidad Nacional Mayor de San Marcos) de Lima, Perú, no ano 2008. Desempenhou cargo de analista de operações em empresa de transporte rodoviário e consultor de projetos de transporte.

### Ficha Catalográfica

Fernández Pérez, Aldo Eliades

Estimativa de matrizes origem-destino para veículos de carga no âmbito do estudo do Plano Diretor de Transporte Urbano da Região Metropolitana de Rio de Janeiro (PDTU-RMRJ) / Aldo Eliades Fernández Pérez ; orientador: José Eugênio Leal. – 2014.

108 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. City logistics. 3. PDTU-RMRJ. 4. Matriz OD. 5. Modelo de quatro etapas. 6. Transporte de cargas. 7. Zonas de tráfego. I. Leal, José Eugênio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

## Agradecimentos

A meu orientador, Professor José Eugenio Leal, por ter aceitado orientar minha dissertação, pela confiança que deu em mim, pelos ensinamentos e contribuição durante a elaboração deste estudo.

A CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos professores do Departamento de Engenharia Industrial, os quais ajudaram na minha formação acadêmica no Mestrado.

À equipe de consultoria da empresa Sinergia Estudos e Projetos Ltda, especialmente a William Aquino, Nino Aquino e Alberto Strozenberg, pela oportunidade que me deram de participar no projeto do PDTU-RMRJ.

Aos meus amigos de Mestrado, meus amigos Maycol, Isaias, Najmat, “Carolinda”, Ramon, Paulo e Juliana os quais fizeram que minha estadia aqui no Rio muito agradável.

Finalmente, agradeço aos meus pais Guzmán e Dionicia, que sempre me apoiaram, aos meus irmãos Miguel e Arturo e a toda minha família.

## Resumo

Pérez, Aldo Eliades Fernández; Leal, José Eugenio (Orientador). **Estimativa de matrizes Origem-Destino para veículos de carga no âmbito do estudo do Plano Diretor de Transporte Urbano da Região Metropolitana de Rio de Janeiro (PDTU-RMRJ)**. Rio de Janeiro, 2014. 108p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A simulação da circulação interna-interna de veículos de carga foi um estudo inédito e inovador para a revisão do Plano Diretor de Transporte Urbano da Região Metropolitana de Rio de Janeiro (PDTU-RMRJ/2011), no qual se faz uma estimativa de vetores de produção e atração (P/A) de viagens de caminhões para 730 zonas de tráfego, de matrizes origem-destino (OD) e a alocação de viagens de veículos de carga para três períodos (pico da manhã, pico da tarde e entre picos). A metodologia e modelo utilizados foram baseados em uma aplicação realizada na cidade de Sevilla (Espanha). Para o caso da RMRJ foram estimados vetores de viagens de dois tipos, um com relação às entregas do tipo “Empresa a Empresa” (Business to Business, B2B) e outro do tipo “Empresa a Domicílio” (Business to Housing, B2H). Como resultados ilustrativos são mostrados os vetores (P/A) de viagens diárias de caminhões agregados por município, uma matriz OD de caminhões no período entre picos agregada por município e a alocação dessas viagens na rede de simulação do PDTU para o período entre picos. Desses resultados, destaca-se que os municípios com maior quantidade (somam mais de 80%) das viagens produzidas e atraídas dentro da RMRJ são apenas cinco: Rio de Janeiro, Duque de Caxias, Niterói, São Gonçalo e Nova Iguaçu; e que as vias mais utilizadas para o tráfego de caminhões são a BR-101, BR-116 e a BR-040.

## Palavras Chave

City Logistics; PDTU-RMRJ; Matriz OD; Modelo de Quatro Etapas; Transporte de Cargas; Zonas de Tráfego.

## Abstract

Pérez, Aldo Eliades Fernández; Leal, José Eugênio (Advisor). **Origin-Destination matrices estimation for freight vehicles for the study of urban transportation Master Plan of the Metropolitan Region of Rio de Janeiro (PDTU-RMRJ)**. Rio de Janeiro, 2014. 108p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Within the framework of the Revision of the Urban Transportation Master Plan for the Rio de Janeiro Metropolitan Region (PDTU-2011) an innovative model was developed – first of its kind in Brazilian cities – for the estimation of truck flows within the study area. Productions and attractions vectors (P/A) of truck trip ends, as well as origin/destination (O/D) matrices for the 730 traffic analysis zones were estimated, and truck assignments for three daily periods (morning peak, afternoon peak, and inter-peaks) were conducted. Model methodology was based in another study conducted for the city of Seville (Spain). Two sets of P/A vectors were estimated, one for business-to-business deliveries (B2B) and another for household deliveries (B2H). Daily truck trip ends P/A vectors aggregated by city are presented, as well as a city level O/D inter-peak truck matrix and the results of its assignment to the PDTU-2011 simulation network. From those illustrative results, it is shown that only five cities (Rio de Janeiro, Duque de Caxias, Niterói, São Gonçalo e Nova Iguaçu) account for more than 80% of truck trips produced and attracted within the Metropolitan Region, and that the most heavily used truck routes are comprised of BR-101, BR-116 and BR-040 expressways.

## Keywords

City Logistics; PDTU-RMRJ; OD Matrix; Model Four Steps; Freight Transport; Traffic Zones.

## Sumário

1	Introdução	12
1.1	Problema a abordar	13
1.2	Objetivos	14
1.3	Relevância do Estudo	14
1.4	Estrutura da Dissertação	15
2	Definição da Área de Estudo	16
2.1	Visão Geral do Estado do Rio de Janeiro	16
2.2	Análise do Transporte no Estado do Rio de Janeiro e a RMRJ	18
2.3	Área de Estudo para o PDTU	21
3	Plano Diretor de Transporte Urbano da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (PDTU-RMRJ) e sua Atualização	26
3.1	Rede e Sistema de Zoneamento da RMRJ	27
3.2	PDTU-RMRJ parte Cargas	38
3.2.1	Modelo de Geração para o PDTU-RMRJ parte Cargas	39
3.2.2	Cálculo das Viagens Originadas e Destinadas de Veículos de Cargas	44
4	O Enfoque da Logística Urbana ou City Logistics no PDTU-RMRJ parte Cargas	50
4.1	Transporte Urbano de Mercadorias	50
4.2	Definição, Visão e Objetivo da City Logistics	54
4.3	Participantes e a Análise do seu Comportamento Sob o Enfoque da City Logistics	56
4.4	PDTU-RMRJ parte Cargas e o Enfoque da City Logistics	60
5	Modelo de Distribuição de Viagens	64
5.1	Aspectos Gerais, Definições e Notação	65
5.2	Método de Fator de Crescimento	67
5.2.1	Vantagens e Desvantagens do Método de Fator de Crescimento	68
5.3	Definição do Modelo Gravitacional de Distribuição	68

5.3.1	Cálculo da Matriz OD mediante a maximização da entropia	70
5.3.2	Modelo Gravitacional com Maximização da Entropia	73
5.3.3	Calibração do Modelo de Gravidade	76
5.4	Cálculo de Matrizes OD a partir de Contagens Volumétricas	78
5.4.1	Formulação do Modelo	80
5.4.2	Método de Solução	81
6	Estudo de Caso	87
6.1	Análise Preliminar	88
6.2	Sobre o Processo de Calibração do Modelo	88
6.3	Uso do <i>Software</i> para a Modelagem do PDTU	89
6.4	Metodologia e Passos Utilizados para o Cálculo das Matrizes OD de Veículos de Cargas	90
6.5	Resultados e Análises	92
6.6	Alocação de Viagens de Veículos de Carga	99
6.7	Validação do Modelo	103
7	Conclusões	104
8	Referências Bibliográficas	106



## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Municípios da RMRJ	21
Tabela 2 – Características numéricas dos municípios da RMRJ 2013	23
Tabela 3 – Frota de veículos no ano 2013 na RMRJ	24
Tabela 4 – Objetivos e melhorias do PDTU 2011	27
Tabela 5 – Número de zonas por município da RMRJ para o PDTU 2011	29
Tabela 6 – Número de zonas pesquisadas por município da RMRJ	32
Tabela 7 – Vias que formam o cerco de restrição para trânsito de caminhões (primeira norma)	35
Tabela 8 – Número de locais varejistas na RMRJ	42
Tabela 9 – Equações do Modelo de Geração para veículos de carga	47
Tabela 10 – Resultados do Modelo de Geração para veículos de carga	48
Tabela 11 – Comportamento dos Participantes da Logística Urbana	57
Tabela 12 – Os objetivos, condições e critérios dos participantes da Logística Urbana	59
Tabela 13 – Representação da Matriz OD	65
Tabela 14 – Vantagens e desvantagens do uso do Método de Fator de Crescimento	68
Tabela 15 – Solução do Problema Multiproporcional utilizando o método de Murchland	85
Tabela 16 – Matriz OD por município para o Pico da Manhã (7hs às 8hs)	93
Tabela 17 – Matriz OD por município para o Entre Picos (um horário entre 10hs às 16hs)	95
Tabela 18 – Matriz OD por município para o Pico da Tarde (17hs30min às 18hs30min)	97

## Lista de Figuras

Figura 1 – Regiões de planejamento do Estado do Rio de Janeiro	17
Figura 2 – Aporte de cada região no PIB	17
Figura 3 – Malha rodoviária do Estado do Rio de Janeiro	18
Figura 4 – Rede do projeto VLT no centro do município do Rio de Janeiro	19
Figura 5 – Municípios da RMRJ segundo o IBGE	21
Figura 6 – A RMRJ considerada para estudo no PDTU 2011	22
Figura 7 – Rede Urbana Intrametropolitana no PDTU 2011	22
Figura 8 – Sistema de zoneamento da RMRJ	28
Figura 9 – Visualização do sistema de zoneamento da RMRJ com o OPENJUMP	30
Figura 10 – Representação da malha viária da RMRJ com o OPENJUMP	31
Figura 11 – Malha viária dos entre os municípios do Rio de Janeiro e Niterói	31
Figura 12 – Distribuição Percentual Horária do Transporte Individual da RMRJ	33
Figura 13 – Distribuição Percentual Horária do Transporte Coletivo da RMRJ	34
Figura 14 – Área com restrição para o trânsito de caminhões	35
Figura 15 – Vias restringidas para circulação de caminhões	36
Figura 16 – Distribuição Percentual Horária do Transporte de Cargas da RMRJ	37
Figura 17 – Sistema de entrega direta	40
Figura 18 – Sistema de entrega por roteiro	40
Figura 19 – Loja de Móveis na RMRJ	43
Figura 20 – Loja de Móveis em algumas zonas entre Rio de Janeiro e Niterói	43
Figura 21 – Rede viária e as Lojas de Móveis na RMRJ	44
Figura 22 – Rede viária e as Lojas de Móveis em algumas zonas entre Rio de Janeiro e Niterói	44
Figura 23 – Fluxo de veículos de carga que entram e saem das zonas	

da cidade	45
Figura 24 – Percentual das viagens de veículos de carga acumuladas por município da RMRJ	49
Figura 25 – Visão geral para uma estrutura de City Logistics	54
Figura 26 – Atores ou participantes da City Logistics	57
Figura 27 – Interação dos participantes da Logística Urbana	60
Figura 28 – Interações entre os participantes da Logística Urbana para o caso do PDTU parte Cargas	62
Figura 29 – Representação da relação entre custo e as viagens entre as zonas i e j	67
Figura 30 – Tipos de Função de Impedância	70
Figura 31 – Ideia do enfoque da maximização da entropia	71
Figura 32 – Representação da aproximação de Stirling	72
Figura 33 – Representação de uma rede	79
Figura 34 – Rede para exemplo	82
Figura 35 – Solução do exemplo	85
Figura 36 – Postos de Contagem na rede viária da RMRJ	89
Figura 37 – Viagens de veículos de carga Produzidas por zona no Pico da Manhã (PM)	94
Figura 38 – Viagens de veículos de Carga Atraídas por zona no Pico da Manhã (PM)	94
Figura 39 – Viagens de veículos de carga Produzidas por zona no Entre Picos (IP)	96
Figura 40 – Viagens de veículos de carga Atraídas por zona no Entre Picos (IP)	96
Figura 41 – Viagens de veículos de carga Produzidas por zona no Pico da Tarde (PT)	98
Figura 42 – Viagens de veículos de carga Atraídas por zona no Pico da Tarde (PT)	98
Figura 43 – Rede-PDTU	100
Figura 44 – Rede-PDTU versus Rede viária total da RMRJ	100
Figura 45 – Nós e Links na Rede-PDTU	101
Figura 46 – Zona com seus nós e links	101
Figura 47 – Carregamento da rede da RMRJ com veículos de carga	102