

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE OPERAÇÕES DE TRANSPORTE URBANO DE CARGA

Renata Albergaria de Mello Bandeira

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Rio de Janeiro
Dezembro de 2018

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE OPERAÇÕES
DE TRANSPORTE URBANO DE CARGA

Renata Albergaria de Mello Bandeira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:

Prof. Márcio de Almeida D'Agosto, D.Sc.

Prof. Suzana Kahn Ribeiro, D.Sc.

Prof. Lino Guimarães Marujo, D.Sc.

Prof. Paulo Afonso Lopes da Silva, Ph.D

Prof. Luís Alberto Duncan Rangel, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2018

Bandeira, Renata Albergaria de Mello

Metodologia para avaliação da sustentabilidade de operações de transporte urbano de carga / Renata Albergaria de Mello Bandeira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XIV, 145 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Márcio de Almeida D’Agosto

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 106-118.

1. Transporte Urbano de Carga 2. Sustentabilidade.
3. Índice I. D’Agosto, Márcio de Almeida. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

“Sê escravo do saber se queres ser
verdadeiramente livre”.
(Sêneca)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Professor Márcio de Almeida D'Agosto pela disponibilidade, incentivo, orientação, críticas e sugestões que possibilitaram a elaboração deste trabalho. Agradeço também pela oportunidade de desenvolvimento de artigos e trabalhos conjuntos, e espero ainda ter novas oportunidades para continuarmos pesquisando juntos.

Aos professores Luís Alberto Duncan Rangel, Vânia Barcellos Gouvêa Campos, Paulo Afonso Lopes da Silva, Lino Guimarães Marujo e Suzana Kahn Ribeiro pelas sugestões para desenvolvimento desta pesquisa, nas bancas de defesa do projeto e de defesa da tese.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Rio de Janeiro pelo conhecimento transmitido.

Aos queridos colegas do Laboratório de Transportes de Carga (LTC) pelo companheirismo.

Aos meus amigos e familiares, por todo incentivo e amizade oferecida.

Aos meus pais, Luiz Carlos e Maria Celia, e ao meu irmão, Luiz Fernando que, sempre estiveram presentes, apoiando e acreditando em mim. Tenho muita sorte em tê-los ao meu lado.

Agradeço ao meu marido e melhor amigo, Adriano, que sempre está ao meu lado, me estimulando e incentivando. Obrigada por todo amor, carinho e apoio.

Em especial, a minha linda Beatriz e ao Bernardo que está a caminho, por me fazerem sentir o maior amor desse mundo.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE OPERAÇÕES DE TRANSPORTE URBANO DE CARGA

Renata Albergaria de Mello Bandeira

Dezembro /2018

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Programa: Engenharia de Transportes

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para avaliação da sustentabilidade de operações de transporte urbano de carga (TUC), sob a perspectiva de operadores de transporte. A metodologia visa preencher algumas lacunas identificadas na literatura existente, como: a carência de pesquisas sobre os critérios que os operadores devem avaliar para selecionar a iniciativa TUC mais indicada para aumentar seu nível de sustentabilidade, bem como a ausência de uma proposta de indicadores ou um índice que permitam tal análise. Portanto, identificou-se um conjunto de indicadores de sustentabilidade para transporte, que foram adaptados para avaliar a sustentabilidade de operações de TUC. Tais indicadores são a base para o desenvolvimento do índice de sustentabilidade para o TUC desenvolvido nesta tese. Propõe-se que este índice, que concilia aspectos econômicos, ambientais e sociais para avaliar e selecionar a operação TUC mais sustentável, seja estimado por meio de um modelo hierárquico-*fuzzy*, de modo a considerar a subjetividade e as incertezas envolvidas neste tipo de avaliação, bem como a adotar pesos diferentes para indicadores distintos. Esse índice limita a quantidade de informações apresentadas, permitindo que empresas e operadores de transporte desenvolvam análises comparativas para avaliar configurações alternativas para suas cadeias de coleta, transferência e distribuição de carga e, em seguida, classificá-las em termos de sustentabilidade. Esta metodologia foi aplicada para avaliar a adoção de triciclos e de veículos comerciais leves elétricos como alternativas para a distribuição postal em *last mile*, por meio do caso de uma empresa pública no Rio de Janeiro, Brasil. Esta aplicação confirmou a consistência, simplicidade, flexibilidade e aplicabilidade da metodologia proposta.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

A METHODOLOGY FOR EVALUATING SUSTAINABLE URBAN FREIGHT
TRANSPORTATION OPERATIONS

Renata Albergaria de Mello Bandeira

December/2018

Advisor: Márcio de Almeida D’Agosto

Department: Transportation Engineering

This research aims to propose a methodology for assessing the sustainability of urban freight transport (UFT) operations, according to the perspective of transport operators. This methodology fills some gaps identified in the existing literature, such as: the lack of studies regarding the criteria that should be assessed by operators in order to select the best suited UFT initiative to increase its sustainability level, as well as the absence of indicators or an index for such analysis. Therefore, a set of sustainability transportation indicators were identified and then adapted for evaluating the sustainability of UFT operations. Such indicators are the basis for the sustainability index for UFT proposed in this thesis. In order to estimate this index, we develop a fuzzy multi-criteria model, considering not only uncertainty but also different weights for various indicators. Moreover, this index limits the amount of information presented, allowing companies and transportation operators to develop comparative analyzes to evaluate alternative configurations for their collection, transfer and load distribution chains and then classify them in terms of sustainability. We apply the proposed methodology in a case study in order to assess the adoption of tricycles and electric light commercial vehicles as alternatives to the last mile of postal distribution, through a case of a public company in Rio de Janeiro, Brazil. This application confirmed the consistency, simplicity, flexibility and applicability of the proposed methodology.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Problema de pesquisa.....	2
1.2	Objetivos.....	5
1.3	Originalidade e relevância	5
1.4	Estrutura da tese	7
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1	A sustentabilidade na logística	12
2.2	Iniciativas sustentáveis para o transporte urbano de carga	17
2.3	Métodos de apoio à decisão adotados para avaliação da sustentabilidade de sistemas de transportes.....	25
2.3.1	Método de Análise Hierárquica (MAH).....	29
2.3.2	Lógica Fuzzy	31
3	PROPOSTA DE INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA TRANSPORTE URBANO DE CARGA.....	34
3.1	Revisão bibliográfica sistemática sobre indicadores de sustentabilidade para o transporte urbano de carga.....	37
3.2	Revisão da literatura sobre indicadores de sustentabilidade para o transporte.....	40
3.3	Indicadores de sustentabilidade para o transporte urbano de carga.....	46
4	PROPOSTA DE ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE PARA TRANSPORTE URBANO DE CARGA.....	52
4.1	Caracterização da operação de transporte urbano de carga	54
4.2	Definição e tratamento das variáveis de entrada (inputs)	55
4.3	Elaboração da Arquitetura da rede fuzzy.....	56
4.4	Processo de inferência e defuzzificação	59
4.5	Avaliação e seleção da melhor opção	67

5	DESENVOLVIMENTO DO ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE PARA O TRANSPORTE URBANO DE CARGA: AVALIANDO AS OPERAÇÕES DE ENTREGA DE CARGA EXPRESSA NO RIO DE JANEIRO	69
5.1	Caracterização da operação de distribuição postal	71
5.1.1	Distribuição Tradicional Intermodal (DTI)	71
5.1.2	Distribuição Tradicional Intermodal alternativa (DTIA)	72
5.1.3	Distribuição com apoio de Triciclo Elétrico (DTE)	73
5.2	Definição e tratamento das variáveis de entrada.....	74
5.2.1	Coleta de dados.....	74
5.2.2	Variáveis de entrada	75
5.3	Rede de Arquitetura <i>Fuzzy</i>	86
5.4	Processo de inferência e defuzzificação	87
5.5	Avaliação e seleção da melhor opção	93
6	CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
	APÊNDICE 1	119
	APÊNDICE 2	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Ampliando o conceito de logística.....	13
Figura 2.2: Estrutura Hierárquica Básica AHP	30
Figura 2.3: Estrutura geral de um sistema de inferência <i>fuzzy</i>	32
Figura 3-1: Resultados da etapa de busca da literatura	38
Figura 3-2: Resultados da etapa de busca da literatura	40
Figura 4-1: Conjunto fuzzy trapezoidal para variável de entrada	56
Figura 4-2: Arquitetura da rede <i>fuzzy</i>	58
Figura 4-3: Conjunto <i>fuzzy</i> triangular para as variáveis de saída	64
Figura 4-4: Variáveis utilizadas no modelo hierárquico- <i>fuzzy</i>	66
Figura 5.1: Distribuição Tradicional Intermodal	72
Figura 5.2: Distribuição com apoio de Triciclo Elétrico	73
Figura 5.3: Rede de arquitetura <i>fuzzy</i>	87
Figura 5-4: Gráfico resumo dos índices para as operações DTI, DTE e DTIA	93
Figura 5-5: Análise de sensibilidade para o ISTUC, variando o peso do índice de desempenho ambiental	96
Figura 5-6: Análise de sensibilidade para o ISTUC, variando o peso do índice de desempenho econômico.....	97
Figura 5-7: Análise de sensibilidade para o ISTUC, variando o peso do índice de desempenho social	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Escala numérica de Saaty	30
Tabela 3.1: Resultados da etapa de busca da literatura	39
Tabela 3.2: Indicadores de transporte sustentável mais aplicados	42
Tabela 3.3: Indicadores de transporte sustentável propostos em pesquisas prévias e podem ser adaptados ao TUC	45
Tabela 3.4: Indicadores de sustentabilidade para o TUC	51
Tabela 4.1: Variáveis <i>fuzzy</i>	55
Tabela 4.2: Base de regras para o Indicador de Desempenho Econômico devido aos indicadores de taxa de ocupação, custo total de transporte e velocidade média operacional...60	60
Tabela 4.3: Interpretação da escala dos índices de desempenho e do ISTUC.....	67
Tabela 5.1: Especificações para cada operação	74
Tabela 5.2: Resultados do teste de Shapiro-Wilk.....	75
Tabela 5.3: Fatores de emissão considerados no estudo.	77
Tabela 5.4: Emissão mensal de GEE e poluentes atmosféricos nas operações DTI e DTA	78
Tabela 5.5: Detalhamento dos itens considerados para composição dos custos totais por tipo de operação	82
Tabela 5.6: Especificação dos custos fixos e variáveis por tipo de operação	82
Tabela 5.7: Valores adotados para as variáveis de entrada	85
Tabela 5.8: Conjuntos <i>fuzzy</i> das variáveis de entrada	86
Tabela 5.9: Vetores linguísticos	86
Tabela 5.10: Base de regras do Indicador de Desempenho Ambiental	88
Tabela 5.11: Vetor linguístico para os índices de desempenho ambiental, econômico e social para cada operação.....	91
Tabela 5.12: Interpretação da escala dos índices de desempenho e do ISTUC.....	94

LISTA DE SIGLAS

ACV- Análise de Ciclo de Vida (em inglês LCA- *Life cycle assessment*)
BEV- Veículo Elétrico a Bateria
BI- Bloco de Inferência –BI
CBA- Análise de Custo-benefício (em inglês CBA - *Cost-benefit analysis*),
CD- Centro de Distribuição
CEA- Análise de Custo-efetividade (em inglês CEA - *Cost-effectiveness analysis*)
CH₄- Metano
CO- Monóxido de Carbono
CO₂- Dióxido de Carbono
CO_{2eq}- Dióxido de Carbono Equivalente
COV- Compostos Orgânicos Voláteis
DOAJ- Diretório de Periódicos de Acesso Aberto (em inglês, *Directory of Open Access Journals*)
DTE- Distribuição com Apoio de Triciclo Elétrico
DTI- Distribuição Tradicional Intermodal
DTIA- Distribuição Tradicional Intermodal alternativa
EIA- Avaliação de impacto ambiental (do inglês EIA - *Environmental impact assessment*)
ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité*);
EUA- Estados Unidos da América
FA- análise fatorial/análise do componente principal (do inglês, *principle component analysis/factor analysis* - PCA / FA)
FDA- Abordagem de Decisão Fuzzy (do inglês, *Fuzzy Decision Approach*)
GC- Grau de Certeza
GEE- Gases de Efeito Estufa
HC- Hidrocarboneto
HCNM – Hidrocarbonetos não Metano
IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INEA- Instituto Estadual do Ambiente
IPCC- *Intergovernmental Panel on Climate Change*
IPK- Índice de Passageiro por quilômetro do ônibus
ISTUC- Índice de Sustentabilidade para o Transporte Urbano de Carga
MACBETH- Técnica de Análise Multicritério (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*)
MAH- Método de Análise Hierárquica (do inglês, *Analytic Hierarchy Process* - AHP)
MAUT-Método da Teoria da Utilidade Multiatributo (do inglês, *Multi Attribute Utility Function Theory*)
MAVT- Teoria do Valor Multiatributo (do inglês, *Multi-Attribute Value Function Theory*);
Min- Mínimo
MMA- Ministério do Meio Ambiente
MME- Ministério de Minas e Energia
MP- Material Particulado
N₂O- Óxido Nitroso
NMHC- Hidrocarbonetos com a Exceção de Metano
NOx- Óxido de Nitrogênio
NTC-Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística
ONU- Organização das Nações Unidas

PA- Poluentes Atmosféricos
PAD- Pontos de Apoio para Distribuição
PBT- Peso Bruto Total
PDTU- Plano Diretor de Transporte do Rio de Janeiro
PEA: População Economicamente Ativa
PIB- Produto Interno Bruto
PROMETHEE- Método Discreto de Cartegoria Multicritério (do inglês, *Preference Ranking Organization Method*)
RBS- Revisão Bibliográfica Sistemática
RC- Razão de Consistência dos Julgamentos
RCHO- Aldeídos
SOx- Óxido de Enxofre
STI- Indicadores de Transporte Sustentável (do inglês *sustainable transport indicators* – STI)
TODIM- Tomada de Decisão Interativa e Multicritério
TOPSIS- Método Multicritério (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*);
TUC- Transporte Urbano de Carga
Und- Unidade
WHO- Organização Mundial da Saúde (do inglês, World Health Organization)

LISTA DE UNIDADES

t- Tonelada
km- Quilometro
kg- Quilograma
 m^3 - Metro cúbico
 m^2 - Metro quadrado
\$- Cifrão
%- Porcentagem
g- Grama
kW- Quilowatt
kWh- Quilowatt.hora
und- Unidade
h- Hora
l- Litro
tep- Tonelada equivalente de petróleo
dBA- Decibéis
US\$- dólar
hab.- habitantes
GWP- potencial de aquecimento global (do inglês, *global warming potential*)
R\$- Real

1. INTRODUÇÃO

Em 2015, a população urbana representou 54% do total da população mundial, ante a 30% em 1950 (WHO, 2017) e 43% em 1990 (BANCO MUNDIAL, 2015). Estima-se que esse número aumente para 60% até 2030 (WHO, 2017), chegando a 70% em 2050 (ONU, 2013). Atualmente, cerca de 80% da população europeia é considerada urbana (ALLEN e BROWNE, 2010), assim como 81% da população norte-americana (US CENSUS BUREAU, 2013). No Brasil este percentual é ainda maior, com 84,72% da população do país vivendo em áreas urbanas (IBGE, 2010).

Esta tendência, em relação à urbanização, tem implicações de caráter socioeconômico e ambiental. As cidades ocupam 2% da massa de terra no mundo, embora produzam aproximadamente 70% da emissão global de dióxido de carbono (ONU, 2012). Ainda, a concentração populacional em centros urbanos gera maior demanda por serviços de transporte, tanto para o deslocamento de passageiros quanto para a distribuição de bens. Este problema se intensifica em cidades altamente povoadas que tenham passado por rápido processo de urbanização, tal como as megacidades, em especial aquelas localizadas em países em desenvolvimento (TAUBENBÖCK *et al.*, 2012; OLIVEIRA, 2016), onde este crescimento tende a ocorrer de forma desordenada. Desta forma, concentra-se uma alta demanda por transporte urbano de passageiros e de carga, porém com uma baixa oferta de serviços, implicando assim em problemas de mobilidade urbana.

A mobilidade urbana é uma característica das cidades que serve de referência às condições das movimentações de pessoas e carga no espaço urbano, envolvendo a utilização de veículos, vias, terminais, controle e toda a infraestrutura acessória (FERNANDES, 2015a). A mobilidade é o elemento que baliza o desenvolvimento urbano, tendo impactos de caráter social, econômico e ambiental. Uma adequada mobilidade urbana contribui para a redução dos níveis de congestionamento de tráfego, do tempo e do custo de deslocamento, do número de acidentes, do consumo de energia e da emissão de poluentes atmosféricos e de gases de efeito estufa, tendo assim um relacionamento direto com a qualidade de vida da população urbana.

Destaca-se ainda que os problemas inerentes à mobilidade das cargas nos centros urbanos afetam diretamente o desempenho da economia de uma região. Assim, para que

o sistema de transportes seja capaz de contribuir para o desenvolvimento econômico de certa localidade, ele precisa possibilitar o deslocamento de cargas no espaço urbano com rapidez e segurança (FERNANDES, 2015a). Contudo, segundo Lindholm e Behrends (2012) e Browne e Attlassy (2007), a promoção da mobilidade das cargas é considerada uma demanda secundária em relação à mobilidade das pessoas (falta de priorização da mobilidade da carga).

Entretanto, o transporte urbano de carga (TUC), definido por Dablanc (2007) como o fluxo de bens e matérias primas que entra, transita e sai de áreas urbanas, implica em impactos sociais, ambientais e econômicos, sobretudo em relação à intensificação dos congestionamentos de tráfego, à poluição sonora, ao consumo de energia, à emissão de poluentes atmosféricos e gases do efeito estufa (GEE), além de promover o aumento dos custos e diminuir a segurança da população, em função do aumento do número de acidentes (MCKINNON *et al.*, 2010). Assim, dada a crescente valorização da sociedade quanto à sustentabilidade socioambiental das suas atividades, faz-se necessário considerar práticas relacionadas ao TUC para vencer os desafios da mobilidade de cargas, que contemplem tanto aspectos econômicos quanto socioambientais, como, por exemplo, a redução do consumo de energia, da emissão de GEE, da poluição atmosférica, do ruído e da intrusão visual, promovendo assim um ambiente urbano mais sustentável. Portanto, visando uma contribuição nesta área do conhecimento, esta tese propõe uma metodologia para avaliação da sustentabilidade de operações de transporte urbano de carga (TUC).

1.1 Problema de pesquisa

O transporte urbano de carga (TUC) apoia a maioria das atividades baseadas na cidade, sendo uma importante fonte de emprego e facilitador do crescimento econômico (CRANIC *et al.*, 2004; LINDHOME E BEHREND, 2012). Entretanto, o TUC tem impactos significativos e de longo prazo sobre a sustentabilidade, tais como aumento do nível de ruído, de emissões de poluentes atmosféricos e de GEE, do congestionamento e de acidentes de trânsito e acidentes (MCKINNON *et al.*, 2012).

Gestores públicos municipais, nos mais diversos centros urbanos, tentam minimizar os impactos do TUC por meio de políticas como licenciamento e regulamentação, pedágio urbano, restrições ao tráfego de veículos, estacionamentos para carga e descarga, entre

outros (RAI *et al.*, 2017). Contudo, os operadores de transportes argumentam que, devido a estas políticas, as autoridades locais acabam por dificultar a distribuição de suprimentos em áreas urbanas de forma eficiente. Ao mesmo tempo, gestores municipais se queixam de que os operadores de transportes não são inovadores nem cooperativos para tornar o transporte urbano de carga mais sustentável (QUACK, 2012).

Operadores de transporte, em geral, têm como objetivo a distribuição e recebimento de cargas ao menor custo possível, oferecendo um serviço rápido e de alta qualidade, de modo a satisfazer as expectativas dos clientes da melhor forma possível (RUSSO E COMI, 2016). Consequentemente, os operadores focam, tradicionalmente, em questões econômicas. No entanto, a crescente preocupação ambiental entre os consumidores e a maioria dos governos em todo o mundo os força a operar buscando a sustentabilidade (MACHARIS *et al.*, 2014).

Uma ampla gama de iniciativas, cujo agente de implantação é o operador de transporte, pode levar ao aumento da sustentabilidade do TUC. Algumas iniciativas são: consolidação da carga; otimização da taxa de ocupação de veículos; entrega noturna; programas de treinamentos de motoristas para direção (*ecodriving*); uso de fontes de energia mais limpas, uso de sistemas de propulsão alternativos; uso de sistemas de informação e de rastreamento de veículos; otimização da roteirização; otimização da operação de carga e descarga com equipamentos motorizados; implantação de equipamentos de controle das emissões dos veículos; utilização de pneus de base mais larga, reduzindo o número de pneus por caminhão; utilização de pneus de baixa resistência ao rolamento; renovação e modernização da frota; redução do peso dos veículos; promoção de melhoria da aerodinâmica dos veículos; manutenção preventiva dos veículos, entre outras (ARVINDSSON, 2013; OLIVEIRA E D'AGOSTO, 2017; QUACK, 2012).

A partir desta lista de iniciativas potenciais, os operadores buscam aquelas capazes de reduzir o impacto de suas atividades, ao mesmo tempo em que trazem vantagens econômicas (BROWNE E ALLEN, 2011). Arvindsson *et al.* (2013) enfatizam que entender essas iniciativas e seus impactos é crucial para determinar como se pode operar de forma mais eficiente. Portanto, segundo a perspectiva dos operadores de transporte, a seleção das iniciativas a serem implantadas é um processo de tomada de decisão

complexo, que envolve uma diversidade de critérios quantitativos e qualitativos para medir os impactos sociais, ambientais e econômicos de cada alternativa, possibilitando uma análise comparativa para determinar aquela com maior potencial em termos de sustentabilidade.

Medidas e conceitos para um transporte urbano de carga mais sustentável foram previamente discutidos na literatura. Entretanto, a maioria desses trabalhos trata o assunto em uma abordagem mais ampla, tal como Munuzuri *et al.* (2005) e Kin *et al.*, (2017), ou restringe a aplicação em uma cidade ou região específica (DABLANC, 2007). Além disso, esses estudos se concentram em políticas públicas e não abordam essas iniciativas no nível gerencial, mais especificamente, para o operador de transporte, tal como Munuzuri *et al.* (2005), Russo e Comi (2016) e Kin *et al.* (2017).

Ainda, a perspectiva dos operadores de transporte urbano de carga é distinta. Os gestores públicos municipais se concentram, principalmente, em resultados sociais e ambientais. Por sua vez, os operadores de transporte têm maior foco nos resultados econômicos; em outras palavras, sobre o poder econômico para sustentar uma atividade ou operação (MIHAIU *et al.*, 2010). Essas especificidades tornam único o processo de tomada de decisão a partir da perspectiva do operador. Portanto, abordam-se nesta tese as seguintes questões de pesquisa:

- Quais são os critérios que os operadores de transporte devem avaliar para selecionar a iniciativa de TUC mais indicada para aumentar seu nível de sustentabilidade?
- Existem indicadores ou um índice que permitam esta análise?
- Quais são os passos a seguir para a avaliação da sustentabilidade de operações de TUC sob a perspectiva dos operadores de transporte?

Para abordar as duas primeiras questões de pesquisa, desenvolveu-se uma revisão bibliográfica sistemática a fim de identificar publicações que propõem indicadores de transporte sustentáveis (do inglês *sustainable transport indicators* - STI) específicos para o TUC, e se as mesmas propuseram um índice de sustentabilidade para avaliação do TUC. A terceira questão de pesquisa é abordada por meio da proposta de uma metodologia que pode ser usada por operadores de transporte para analisar e comparar,

em termos de sustentabilidade, configurações alternativas para sua cadeia de coleta, transferência e distribuição de carga em áreas urbanas.

1.2 Objetivos

Esta tese tem como objetivo geral propor uma metodologia para avaliação da sustentabilidade de operações de transporte urbano de carga, sob a perspectiva de operadores de transporte. Para isso, os objetivos específicos desta tese são:

1. Identificar os principais critérios que devem ser avaliados por operadores de transporte para selecionar, entre alternativas de operação de TUC, aquela com maior nível de sustentabilidade;
2. Identificar e propor indicadores de sustentabilidade específicos para o TUC;
3. Identificar e propor um índice para avaliar a sustentabilidade de operações de TUC; e
4. Desenvolver uma metodologia para avaliação da sustentabilidade de operações de TUC, sob a perspectiva de operadores de transporte, e aplicá-la em um estudo de caso.

1.3 Originalidade e relevância

O aspecto da originalidade deste trabalho se justifica pelo fato de não ter sido possível identificar na literatura existente, por meio de uma revisão bibliográfica sistemática, estudos preliminares que abordassem os critérios que os operadores de transporte devem avaliar para selecionar a iniciativa de TUC mais indicada para aumentar seu nível de sustentabilidade, e nem a proposta de indicadores ou de um índice que permita este tipo de análise. Tampouco foi identificado um procedimento estruturado que defina os passos que devem ser seguidos para a avaliação da sustentabilidade de operações de TUC sob a perspectiva dos operadores de transporte.

Portanto, destaca-se o caráter inovador desta tese que propõe uma metodologia, com base em um conjunto de indicadores e um índice, para avaliação e seleção de operações sustentáveis de TUC, sob a perspectiva de operadores de transporte, utilizando conceitos de lógica *fuzzy* e de métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão. A

opção pelo desenvolvimento de um modelo hierárquico-*fuzzy* se justifica pelo fato de que a lógica *fuzzy* permite incorporar o conhecimento de especialistas em meio ambiente e transportes no processo, considerando a subjetividade e as incertezas envolvidas neste tipo de avaliação. Além disto, a adoção de conceitos relacionados a métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão permite considerar pesos distintos para diferentes indicadores de sustentabilidade, abordando assim uma lacuna na literatura previamente apontada por Reisei *et al.* (2014) e Santos e Ribeiro (2013).

A principal contribuição desta tese para o meio acadêmico consiste na proposta de um modelo hierárquico-*fuzzy* para o cálculo de um índice composto que mede aspectos multidimensionais da sustentabilidade, que não podem ser completamente abordados apenas por indicadores individuais. Assim, indo além da abordagem tradicional que se limita a considerar atributos financeiros e o nível de serviço para avaliar o desempenho de operações de transporte de carga, o índice proposto busca conciliar aspectos econômicos, ambientais e sociais para avaliar e selecionar alternativas sustentáveis para o TUC. Esse índice limita a quantidade de informações apresentadas, permitindo que empresas e operadores de transporte desenvolvam análises comparativas para avaliar configurações alternativas para suas cadeias de coleta, transferência e distribuição de carga e, em seguida, classificá-las em termos de sustentabilidade.

Consequentemente, esta metodologia pode ser adotada por empresas e operadores de transporte para analisar sua própria cadeia de coleta, transferência e distribuição e identificar configurações mais sustentáveis para o TUC. Desta forma, esta tese também traz contribuições para o mercado ao fornecer uma metodologia que pode ser adotada como uma ferramenta simples e flexível de apoio a um processo de tomada de decisão que envolve diversos critérios quantitativos e qualitativos para medir os impactos sociais, ambientais e econômicos de cada alternativa, possibilitando uma análise comparativa para determinar a configuração com maior potencial em termos de sustentabilidade.

Além disto, a metodologia proposta pode ser usada para *benchmarking* entre diferentes operadores de transporte urbano de carga, de modo que os clientes poderiam utilizar o índice proposto em seu processo de tomada de decisão com relação à seleção de empresas de transporte a serem contratadas. Enfim, a metodologia pode ser aplicada

como base para o desenvolvimento de programa de certificação de sustentabilidade para o TUC. Esse programa reconheceria os participantes que atingissem um nível mínimo de desempenho em operações de transporte urbano de carga. Logo, com base nos indicadores e no índice de sustentabilidade propostos, metas específicas seriam definidas para diferentes níveis de sustentabilidade alcançados pelos operadores de transporte.

1.4 Estrutura da tese

Para que seja possível o desenvolvimento desse estudo, considerou-se uma estrutura com seis capítulos.

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução, o problema de pesquisa, os objetivos deste estudo, a originalidade e relevância da pesquisa, além da estrutura da tese.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica desta tese. Assim, aborda-se uma discussão sobre o transporte urbano de carga e a importância da sustentabilidade para este tipo de operação. Também é apresentado um conjunto de iniciativas que podem ser adotadas por operadores de transporte com o intuito de aumentar a sustentabilidade no TUC. Enfim, o capítulo apresenta os principais métodos de apoio à decisão que podem ser empregados para avaliação da sustentabilidade de sistemas de transporte, explicando conceitos referentes à lógica *fuzzy* e a métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão.

O Capítulo 3 apresenta as diferenças entre uma revisão bibliográfica narrativa e a revisão bibliográfica sistemática, métodos de pesquisa adotados nesta etapa da tese. Em seguida, são apresentados os resultados da revisão bibliográfica sistemática desenvolvida com o objetivo de identificar indicadores de sustentabilidade para o TUC, bem como nos resultados da revisão bibliográfica narrativa sobre indicadores de sustentabilidade para o transporte em geral, desenvolvidas nesta tese. A partir destas revisões, é proposto um conjunto de indicadores de sustentabilidade para o transporte urbano de carga, classificados segundo o impacto social, ambiental e econômico.

O conjunto de indicadores de sustentabilidade para o TUC, apresentados no Capítulo 3, é a base para a estimativa de um índice global para a avaliação da sustentabilidade de

operações de transporte urbano de carga. Assim, o Capítulo 4 apresenta a metodologia para a estimativa deste índice, com base na proposta de um modelo hierárquico-*fuzzy*.

O Capítulo 5 traz uma aplicação da metodologia proposta na tese. Os resultados desta aplicação são apresentados neste capítulo em cinco seções, correspondentes a cada uma das etapas dessa metodologia, a saber: caracterização da operação de transporte urbano de carga; definição e tratamento das variáveis de entrada (*inputs*); elaboração da arquitetura da rede *fuzzy*; procedimento de inferência e defuzzificação; e avaliação e seleção da melhor opção em termos de sustentabilidade.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões, limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As cidades concentram uma alta demanda por serviços e bens materiais. Por sua vez, o consumo nas cidades depende da entrega frequente de alimentos e produtos de varejo, da distribuição de mercadorias para empresas, da coleta de resíduos e, ainda, de um mercado de entregas a domicílio em expansão (BEHRENDT, 2016), acarretando assim em uma crescente demanda por transporte urbano de carga (TUC). O TUC envolve a movimentação de matérias primas, produtos acabados ou resíduos em áreas urbanas, por meio de transferência, coleta ou distribuição, constituindo os segmentos de suprimento e/ou distribuição física das cadeias de suprimento (OLIVEIRA, 2016). Deste modo, o TUC é indispensável para as atividades industriais, comerciais e de lazer, sendo fundamental para a vitalidade econômica das cidades, além de ajudar a apoiar estilos de vida urbanos em aspectos como o varejo, turismo e entretenimento (QUAK, 2008; MUÑOZ-VILLAMIZAR *et al.*, 2018).

O TUC pode representar até 28% dos custos totais de transporte em uma cadeia logística (MUÑOZ-VILLAMIZAR *et al.*, 2015). Ainda, o aumento da frota total de veículos, os congestionamentos, a inadequada oferta de vagas de carga e descarga e as reduzidas janelas horárias para coleta e entrega contribuem para elevar os custos do TUC, além de reduzir a previsibilidade da entrega de mercadorias (CNT, 2018). Assim sendo, uma operação de TUC, bem planejada e eficiente, pode contribuir significativamente para aumentar a rentabilidade das empresas embarcadoras e dos operadores de transportes, por meio da redução do custo total de transporte e do capital empatado em estoque, ao mesmo tempo em que contribui para aumentar o nível de serviço e a qualidade do atendimento aos clientes (KARLSSON E NORR, 1994; MUÑOZ-VILLAMIZAR *et al.*, 2018).

Contudo, o transporte urbano de carga está associado a impactos negativos sobre a sustentabilidade. O TUC é responsável por aproximadamente um quarto do tráfego nas ruas de uma cidade típica, mas é a fonte de emissões de gás carbônico (CO₂) que mais cresce nas áreas urbanas (DABLANC, 2007). Consequentemente, as cidades modernas enfrentam congestionamento de tráfego, utilização da capacidade da infraestrutura, carência de espaço público, poluição atmosférica, ruído e acidentes, decorrentes do transporte de carga em áreas urbanas (AWASTHI E CHAUHAN, 2011). Esses desafios, geralmente, são comuns a todas as grandes cidades, apesar de suas diferenças em termos

de circunstâncias geográficas, históricas e culturais (LINDHOME E BEHREND, 2012). Além disso, este problema tende a se intensificar, dado que o volume já significativo de veículos de carga que se deslocam dentro dos limites da cidade cresce rapidamente (DOMÍNGUEZ *et al.*, 2012). As práticas *just-in-time* adotadas na logística e o crescimento do comércio eletrônico, que gera volumes significativos de entregas domiciliares, estão entre os principais fatores que contribuem para esse fenômeno (CRANIC *et al.*, 2004).

Entretanto, apesar dos problemas ambientais associados ao TUC e da sua contribuição fundamental para o desempenho das atividades de pessoas e empresas, relativamente pouca atenção tem sido dada a esse tema por parte de pesquisadores e planejadores de transportes (LINDHOME E BEHREND, 2012). Em comparação com o transporte de passageiros, pouco se sabe sobre o transporte de carga em áreas urbanas, havendo uma carência de dados e estudos sobre o tema (CNT, 2018). A maioria dos estudos realizados sobre transporte urbano sustentável se concentra no transporte de passageiros, bem como na maioria das atividades de planejamento do governo (HENSHER & PUCKETT, 2005).

De acordo com Oliveira *et al.* (2017), há uma falta de planejamento urbano e de transporte adequado, considerando a mobilidade de cargas. Segundo Smart Freight Centre (2017), cerca de 50% das políticas de planejamento de transporte, adotadas por cidades em países em desenvolvimento, abordam o transporte de passageiros, enquanto apenas 5% destas políticas tem como foco o TUC. Lindhome e Behrends (2012) destacam que os problemas de transporte de carga no nível da cidade ainda não são bem compreendidos e não há uma metodologia difundida especificamente voltada para a análise e o planejamento do TUC.

No entanto, o transporte urbano de carga é ainda mais complexo e heterogêneo que o transporte urbano de passageiros e do que o próprio transporte de carga em longa distância (HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2014). Esta complexidade decorre, dentre outros motivos, da grande variedade de demandas por mercadorias – em diferentes locais e horários –, da reduzida capacidade de expansão da infraestrutura viária e da insuficiente oferta de rotas e modos alternativos (OGDEN, 1992; HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2014). Ademais, o TUC envolve uma rede altamente interconectada e heterogênea de atores,

como: produtores, embarcadores, operadores de transporte em geral, recebedores (varejo ou domicílios), agências reguladoras, planejadores de transporte, cidadãos e o governo (ANAND *et al.*, 2012; MACHARIS & MELO, 2011; HOLGUÍN-VERAS, 2010). Esta diversidade e o número de atores envolvidos no TUC evidencia a complexidade da gestão e operação desse setor (CNT, 2018).

Para lidar com esses desafios, os gestores municipais, em diversos centros urbanos, estão investindo em iniciativas de logística urbana sustentável para melhorar as condições do TUC e reduzir os impactos negativos sobre os seus habitantes e o meio ambiente (AWASTHI E CHAUHAN, 2011). Nesse sentido, em diversas cidades no Brasil e no mundo, tem-se procurado mitigar esses impactos com a adoção de medidas de restrição de circulação e operação de veículos de transporte de carga e de substituição da frota – por veículos de menor dimensão e/ou com menores níveis de emissão de poluentes –, com diferentes graus de cumprimento dos objetivos pretendidos (DABLANC, 2007; CNT, 2018).

Estas restrições aos veículos de carga, que têm sido implantadas em diversos municípios, não afetam apenas os atores mais imediatos (embarcadores e transportadores), mas toda a rede de distribuição, condicionando o desempenho das atividades de transporte de carga em meio urbano (CNT, 2018). No entanto, existe uma série de iniciativas que podem ser adotadas para aumentar a sustentabilidade do transporte urbano de carga pelos diferentes atores envolvidos neste tipo de operação, mantendo seu desempenho econômico ao mesmo tempo em que contribuem para melhorar seu desempenho sócio-ambiental. Assim sendo, é essencial conhecer os reais impactos de cada iniciativa, de modo a poder selecionar a mais indicada para cada contexto e objetivo a ser atingido.

Portanto, a seção a seguir apresenta uma discussão sobre a questão da logística sustentável e a importância do transporte de carga, em especial o TUC, para se atingir a sustentabilidade na cadeia de suprimentos, destacando a perspectiva do operador de transporte. Ainda, neste capítulo, são apresentadas as iniciativas que podem levar ao aumento da sustentabilidade do TUC, tendo como foco aquelas que podem ser aplicadas por embarcadores e operadores de transporte. Enfim, o capítulo apresenta os principais

métodos de apoio à decisão que podem ser empregados para avaliação da sustentabilidade de sistemas de transporte.

2.1 A sustentabilidade na logística

O conceito tradicional de logística está associado ao processo de planejamento, implantação e controle do fluxo de mercadorias, serviços e informações do ponto de origem ao ponto de destino com objetivo de atender às restrições de serviço, buscando a redução dos custos totais e o aumento do nível de serviço (CSCMP, 2007). Assim, além de ser uma atividade vital para toda a sociedade por viabilizar o suprimento de cargas e serviços, representando de 7% a 9% do produto interno bruto (PIB) mundial e 12% do PIB brasileiro, a logística também tem um impacto importante nos resultados econômicos das empresas, participando com 8,7% dos seus custos totais (OLIVEIRA E D'AGOSTO, 2017).

Tradicionalmente, a logística vem considerando com maior ênfase, aspectos econômicos e financeiros (OLIVEIRA, 2016). Entretanto, a sociedade está cada dia mais consciente dos impactos de suas atividades no meio ambiente, de modo que, além desta visão tradicional, a logística também deve objetivar a redução dos impactos socioambientais promovidos por suas atividades (MCKINNON *et al.*, 2010). Nesse contexto, surgem os conceitos de logística de baixo carbono, logística verde e logística sustentável, conforme apresentado na Figura 2.1.

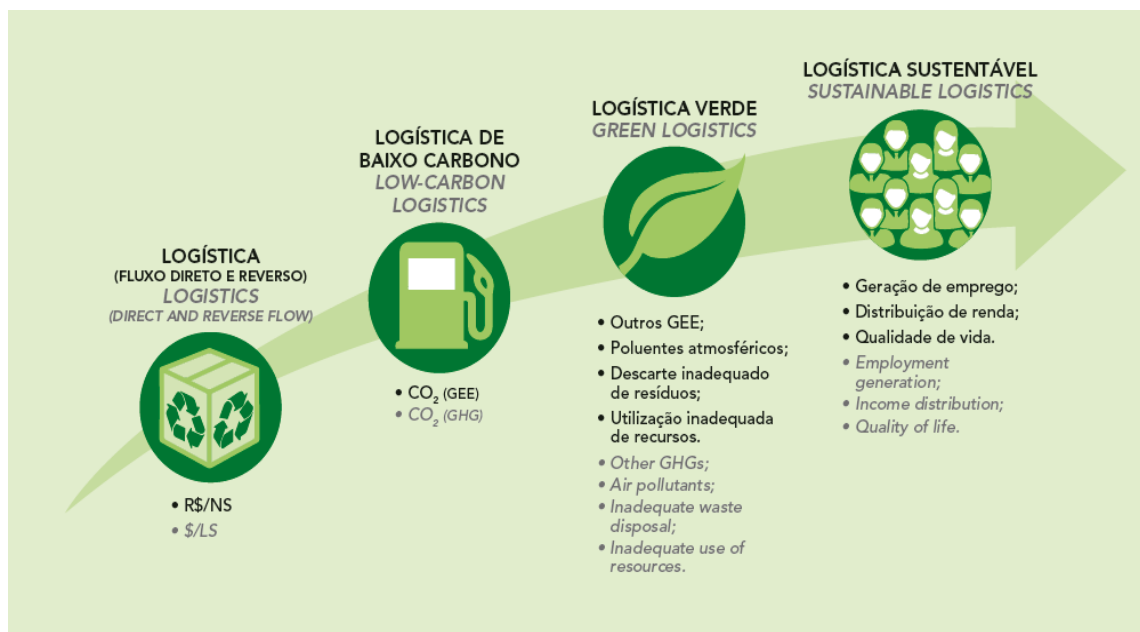


Figura 2.1. Ampliando o conceito de logística
Fonte: Oliveira e D’Agosto (2017)

Desenvolvimento sustentável, segundo a *Brundtland Commission* (1987), é “aquele que satisfaz as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades, sendo composta por três aspectos principais: ambiental, econômico e social”. Sendo assim, à medida que cresce a consciência da sociedade em relação à necessidade de promover a gestão sustentável das atividades produtivas, ou seja, a promoção de um conjunto de ações que estimulem a utilização dos recursos disponíveis no presente, sem comprometer a sua disponibilidade no futuro, o conceito de logística também evolui (MCKINNON *et al.*, 2010). Nesse sentido, a logística de baixo carbono busca a redução do uso de combustíveis fósseis e da emissão de CO₂. A evolução deste conceito é a logística verde, que amplia a abrangência para a consideração de outros atributos ambientais, como a emissão de poluentes atmosféricos, produção de ruído e vibração, consumo de água e geração de resíduos sólidos e líquidos. Enfim, a logística sustentável é a mais abrangente, introduzindo a consideração do aspecto social na avaliação do desempenho logístico (OLIVEIRA E D’AGOSTO, 2017).

A logística sustentável pode ser um grande aliado no sentido de contribuir com as questões relativas à concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera e à emissão de poluentes que tendem a prejudicar a saúde humana, especialmente ao que se

refere ao transporte de carga (OLIVEIRA, 2016). O transporte de carga é fundamental para o bom desempenho na coleta, transferência e distribuição de cargas e prestação de serviços em uma cadeia logística (OLIVEIRA E D'AGOSTO, 2018). Logo, um bom sistema de transporte possibilita que bens e serviços sejam comercializados a preço competitivo, em lugares distantes de onde foram produzidos. Esta abrangência na comercialização de bens potencializa a redução dos preços das mercadorias e a economia de escala na produção, além de contribuir para aumentar a competitividade do mercado (CHAABANE *et al.*, 2012; OLIVEIRA E D'AGOSTO, 2018).

Por outro lado, o transporte de carga em uma cadeia de suprimentos prejudica a qualidade do ar local, gera ruído e vibração, provoca acidentes e contribui com o aquecimento global (MCKINNON *et al.*, 2010). Segundo dados da Calculadora Global (2018), 26,6% do consumo energético global, em 2011, se destinaram ao setor de transporte, sendo que 42% deste total se destinaram ao transporte de carga. No Brasil, 32,4% do consumo energético final, em 2016, se destinou ao setor de transporte (EPE, 2017), sendo que 40% deste total se destinaram ao transporte de carga (La Rovere *et al.*, 2018). Consequentemente, em função da sua quase total dependência do uso de combustíveis derivados de petróleo, o transporte de carga é responsável por 7,3% das emissões de GEE no Brasil (D'AGOSTO *et al.*, 2018).

Nesse sentido, iniciativas mais eficientes e objetivas que envolvam o transporte de carga, promovendo a mitigação dos custos ambientais, sociais e econômicos, contribuem para reduzir o consumo de energia, melhorar a qualidade de vida da população local e impactar de forma significativa na redução da emissão de GEE e poluentes atmosféricos (BARTH E BORIBOONSOMSIN, 2008; OLIVEIRA E D'AGOSTO, 2017, 2018). Contudo, estas iniciativas, que visam à redução dos impactos sócio-ambientais das operações de transporte, devem estar alinhadas à maximização dos lucros e ao aumento da competitividade das empresas, de modo a atender aos três aspectos da sustentabilidade.

Neste contexto, é importante destacar a relevância do TUC para a sustentabilidade das atividades de transporte nas cadeias logísticas. Tal como previamente apresentado, o transporte urbano de carga contribui para comprometer a qualidade do ar, intensificar o efeito estufa, promover poluição sonora e aumentar o risco de acidentes de trânsito

(BROWNE & ATTLASSY, 2007; MCKINON, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2017). Devido aos seus impactos negativos em relação ao meio-ambiente e à qualidade de vida nas cidades, o TUC desperta a antipatia da população (LEONARDI *et al.*, 2012). Além disto, o TUC é responsável por até 28% do custo total de transporte (SHOEMAKER *et al.*, 2006; MUÑOZ-VILLAMIZAR *et al.*, 2015), que, por sua vez, representa 7,1% do Produto Interno Bruto nacional (PIB-N) (LIMA & LOBO, 2014). Deste modo, a promoção de iniciativas sustentáveis em operações de transporte urbano de carga tem um impacto significativo para se atingir benefícios de cunho econômico, ambiental e social, englobando assim os três pilares da sustentabilidade. Portanto, o TUC tem um papel relevante dentro do conceito de logística sustentável.

Ao mesmo tempo, empresas de classe mundial e com atuação global compreenderam que termos como “verde” e “sustentável” vão além de um compromisso ambiental, representando, de fato, a prática de ações que aprimoram a efetividade de suas operações, sendo uma questão de sobrevivência no mercado (OLIVEIRA E D’AGOSTO, 2017). Assim, as empresas estão cada vez mais comprometidas em estabelecer e atingir metas relacionadas ao conceito de logística sustentável, porém buscam conciliar a maximização dos lucros e o aumento do nível de serviço com seu desempenho socioambiental (OLIVEIRA E D’AGOSTO, 2018).

Empresas globais, como a Pepsi, Coca-cola, AT&T, UPS e Kraft, estão adotando veículos híbridos em suas frotas na busca da redução do consumo de energia e consequente redução do impacto ambiental de suas operações. A Kraft, por exemplo, utiliza veículos híbridos diesel-elétrico desde 2009, tendo diminuindo em 30% o consumo total de combustíveis (MAGAMANN, 2014). A Walmart, por sua vez, aplicou inovações em seu projeto “*Walmart Advanced Vehicle Experience*”, por meio do uso de materiais mais leves na carroceria e avanços da aerodinâmica do veículo, de modo a reduzir a tara dos veículos e, com isso, diminuir o consumo energético (MAGAMANN, 2014). A Nestlé, por exemplo, economizou US\$ 510 milhões, entre 1991 e 2006, pela combinação de iniciativas relacionadas à redução, reutilização e reciclagem de embalagens em sua cadeia de suprimentos global (MYERSON, 2016).

No Brasil, as empresas também têm buscado aumentar a sustentabilidade de suas operações logísticas, sob o compromisso com a responsabilidade socioambiental

corporativa. A Ambev, por exemplo, assinou um termo de cooperação com a VW Caminhões e Ônibus (WCO) para o desenvolvimento de um modelo de negócios de mobilidade elétrica, com o objetivo de viabilizar a utilização da propulsão elétrica na distribuição urbana no país. Entre 2014 e 2017, a empresa reduziu em 33,9% as emissões de GEE de sua frota, e ainda anunciou que, até 2023, terá um terço de sua frota composta por caminhões elétricos, visando aumentar a sustentabilidade de suas operações (TECNOLOGÍSTICA, 2018).

Outro exemplo de que as empresas que atuam no país estão cada vez mais conscientes de sua responsabilidade com a sustentabilidade é o sucesso alcançado pelo Programa Logística Verde Brasil (PLVB). Esta iniciativa, sob a coordenação do Laboratório de Transporte de Carga (LTC) da COPPE¹/UFRJ², busca capturar, consolidar e aplicar conhecimentos com o objetivo de reduzir a intensidade das emissões de GEE e de poluentes atmosféricos, bem como aprimorar a eficiência da logística e do transporte de carga no Brasil, por meio do desenvolvimento progressivo de um programa nacional de sustentabilidade em logística, que dará autonomia e capacitará os agentes que apoiam estas atividades e nelas atuam (OLIVEIRA E D'AGOSTO, 2017). Iniciado em 2016, com empresas membro como a Coca-Cola do Brasil, Dow, HP, Unilever, Natura, Heineken Brasil e RGLOG, o programa tem crescido e atraído a participação de empresas globais como a BYD, Clariant, L'Oreal, Mercedes-Benz do Brasil, Scania, Ypê, Siemens, Lojas Renner, Ipiranga, entre outras (OLIVEIRA E D'AGOSTO, 2018).

Neste contexto, destaca-se importância do transporte urbano de carga para aumentar a sustentabilidade das operações logísticas e o crescente interesse das empresas pelo tema. Para isso, são diversas as iniciativas relacionadas ao TUC que podem ser adotadas pelas empresas (tanto embarcadores quanto operadores de transportes) que visam aumentar a sustentabilidade de suas operações logísticas. A seção a seguir apresenta uma discussão sobre tais iniciativas.

¹ Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia

² Universidade Federal do Rio de Janeiro

2.2 Iniciativas sustentáveis para o transporte urbano de carga

Estudos vêm sendo realizados pela comunidade acadêmica com o objetivo de encontrar soluções para o TUC e reduzir seus impactos negativos (DA SILVA *et al.*, 2018). Dentre estes, destacam-se iniciativas como o VREF Center of Excellence for Sustainable Urban Freight Systems (HOLGUÍN-VERAS, 2015), o Best Urban Freight Solutions (BESTUFS) e o Smart Freight Center (SFC). A primeira compõe uma rede norte-americana e as demais europeias que têm, entre seus objetivos, identificar, descrever e divulgar as melhores práticas e critérios de sucesso em relação às Soluções Logísticas para as Cidades. No Brasil, destaca-se o PLVB que, por meio do Guia de Referência em Sustentabilidade, divulga boas práticas para o transporte de carga e para a logística que atendam especificamente à realidade brasileira (OLIVEIRA E D'AGOSTO, 2017; OLIVEIRA, 2016).

Esta seção apresenta a consolidação de um conjunto de 20 iniciativas relacionadas ao TUC, propostas pelo VREF Center of Excellence for Sustainable Urban Freight Systems, o BESTUFS, o Smart Freight Center e o PLVB, que podem ser adotadas por empresas privadas, tanto embarcadores quanto operadores de transporte, que buscam aumentar a sustentabilidade de suas operações logísticas. Assim, com base em Oliveira (2016) e Oliveira e D'Agosto (2017), a definição destas iniciativas e uma análise sobre sua aplicabilidade são apresentadas a seguir:

1. Implantação de centros de consolidação de carga em área urbana:

Compartilhados por duas ou mais empresas, estes centros são posicionados entre os armazéns das fábricas ou centros de distribuição e os clientes finais. Nestes locais, as cargas são agregadas por volume e peso, de modo a minimizar o total de viagens por veículos que não têm a sua capacidade atingida (na forma *less than truck load*) e maximizar as viagens nas quais a capacidade dos veículos é aproveitada ao máximo (na forma *full truck load*). Além da possibilidade de reduzir a distância entre o ponto de origem e o local onde será feita a entrega e/ou coleta da carga, esta iniciativa também implica no aprimoramento do uso da capacidade dos veículos. A iniciativa demanda investimento inicial para aquisição de infraestrutura, bem como despesas de manutenção. Entre os possíveis impactos desta iniciativa, destacam-se a possibilidade de redução de

custos, da emissão de GEE e de poluentes atmosféricos, além do aumento da segurança, confiabilidade, flexibilidade e tempo de operação.

2. **Implantação de centros de distribuição em área urbana:** São centros de uso exclusivo de uma empresa, próximos a áreas urbanas, cujo objetivo consiste em reduzir a necessidade de longos deslocamentos para abastecimento do estoque da rede de distribuição física. Por se posicionar de forma estratégica na rede de distribuição física, têm o potencial de proporcionar redução do número de deslocamentos, bem como a maximização do uso da capacidade disponível dos veículos de coleta e de entrega, podendo impactar positivamente os atributos econômicos e ambientais. Porém, sua adoção demanda investimento inicial para aquisição de infraestrutura e despesas de manutenção.
3. **Implantação de equipamento auxiliar de geração de energia para redução de consumo de combustível fóssil:** Trata-se de um equipamento instalado em um sistema de propulsão convencional (motor de combustão interna e sistema de transmissão mecânico) que auxilia a geração de energia para a propulsão do veículo, contribuindo para a redução do consumo de energia fóssil e consequente redução da emissão de GEE e poluentes atmosféricos. Sua adoção demanda investimento inicial para aquisição do equipamento e sua instalação no veículo, além de custos adicionais de manutenção. Assim, a adoção desta iniciativa deve considerar a compensação esperada no custo operacional entre o investimento inicial associado às despesas de manutenção e a economia de combustível oriunda da utilização do equipamento.
4. **Implantação de equipamento de controle das emissões dos veículos:** Trata-se de uma prática de *retrofit* que consiste na implantação de filtros e catalisadores para controle das emissões de poluentes atmosféricos nos veículos. Veículos novos, que têm por obrigação atender a legislação mais restritiva quanto à emissão de poluentes atmosféricos, normalmente já dispõem deste tipo de equipamento instalado de fábrica. Sua adoção demanda investimento inicial para a aquisição do equipamento, além de despesas para sua manutenção, o que implica em aumento do custo operacional. Ainda, estes equipamentos podem gerar impactos no sistema de exaustão dos motores (restrição aos gases de

escape), podendo levar ao aumento do consumo de combustível e da emissão de GEE.

5. **Manutenção preventiva dos veículos:** Esta iniciativa visa evitar problemas mecânicos imprevistos, ocasionando quebras, avarias, excessivo consumo de energia e emissão de GEE e poluentes atmosféricos. Sua adoção demanda investimento inicial para estabelecimento de um programa de manutenção preventiva para uma frota de veículos, porém, em médio e longo prazo, espera-se que este programa leve à redução das despesas com manutenção e consumo de energia, diminuindo assim os custos operacionais.
6. **Otimização da taxa de ocupação do veículo:** Consiste na adoção de técnicas para melhorar a organização da carga no interior do veículo, visando maximizar a utilização de sua capacidade, respeitando a relação peso/volume disponível (cubagem). Em função da complexidade de aplicação de tais técnicas, geralmente é necessário o uso de tecnologia de informação e métodos de programação para apoiar esta iniciativa sem comprometer os tempos de carga e descarga. Assim, é necessário avaliar se os benefícios em termos de redução de custo pela otimização do espaço ocupado pela carga no veículo, incluindo a minimização das viagens de retorno vazias, e variações no nível de serviço (tempo de operação) justificam a adoção desta iniciativa e respaldam os benefícios ambientais esperados.
7. **Otimização da operação de carga e descarga com utilização de equipamentos motorizados:** consiste no uso de equipamentos motorizados (usualmente movidos à energia elétrica) para a operação de carga e descarga dos veículos com objetivo de reduzir o tempo desta atividade. Sua adoção demanda investimento inicial para a aquisição dos equipamentos e despesas adicionais para sua manutenção. Assim, é necessário avaliar se a redução esperada no custo operacional pela redução do tempo de operação oriunda da utilização do equipamento motorizado para carga e descarga, e que pode impactar positivamente a utilização dos ativos (veículos e equipamentos), compensa o investimento inicial e despesas de manutenção. Ainda, esta iniciativa pode apresentar benefícios sob a ótica social, em particular no caso de cargas de alto

peso específico (material de construção, produtos siderúrgicos e metalúrgicos, alimentos e bebidas).

8. **Otimização das rotas:** Técnicas para aprimorar o planejamento de rotas que permitem a diminuição do número de viagens e/ou do percurso de cada viagem realizada por veículo. Em geral, o setor privado adota a otimização das rotas como parte de um sistema de suporte à decisão para aumentar a eficiência do gerenciamento de frotas (HOLGUÍN-VERAS, 2015). Porém, em função da complexidade de aplicação de tais técnicas, é necessário o uso de ferramentas de pesquisa operacional, tecnologia de informação e métodos de programação para apoiar tal iniciativa, o que requer investimento inicial, bem como de despesas para a manutenção do suporte das ferramentas necessárias. Contudo, em médio e longo prazo, esta iniciativa pode levar à redução de custos, de emissão de GEE, de poluentes atmosféricos, do consumo de energia e do tempo de operação. Segundo Holguín-Veras (2015), esta iniciativa pode levar à redução da distância percorrida, tanto por veículos pesados quanto veículos leves, em até 13%.
9. **Promoção de melhoria da aerodinâmica dos veículos:** Trata-se da utilização de veículos que tenham projeto de cabine, chassi e carroceria (*design*) que permita menor resistência aerodinâmica, o que proporciona redução no consumo de energia e aumenta a estabilidade para o deslocamento do veículo. Também é possível adaptar equipamentos específicos (defletores) capazes de reduzir a resistência aerodinâmica em veículos que não foram projetados com tais características. Quando a energia consumida é oriunda de combustíveis fósseis, esta prática acarreta menor emissão de GEE e poluentes atmosféricos. Sua adoção demanda investimento inicial na aquisição de um veículo projetado com tais características ou na aquisição dos equipamentos adicionais para a redução da resistência aerodinâmica, além das despesas de manutenção adicionais específicas para tais equipamentos. Logo, é necessário avaliar se os benefícios em termos de redução de custo operacional decorrente da redução de consumo de combustível compensam o investimento inicial e as despesas adicionais.
10. **Coleta e distribuição noturna:** A realização de operações de coleta e distribuição de cargas em horários alternativos aos usualmente praticados

(horário comercial) possibilita a redução dos tempos de coleta e/ou entrega, devido à redução da permanência dos veículos nos congestionamentos de tráfego, além da possibilidade de ocorrer maior rapidez nas operações de carga e descarga, uma vez que as entregas e coletas são feitas em horários em que os estabelecimentos comerciais têm menor movimento de clientes. Segundo Holguín-Veras *et al.* (2015; 2016), este tipo de medida pode levar a redução de emissões de GEE entre 45 e 67%. Porém, a aplicação desta iniciativa depende da disponibilidade de segurança pública adequada, do compromisso entre fornecedor e cliente, e de mão de obra disponível para realizar a operação nos horários alternativos. Logo, esta iniciativa leva a despesas adicionais relativas a pagamentos de mão de obra, como adicional noturno, e para a necessidade de contratação de outros recursos que permitam a operação em horário alternativo. Além disto, esta iniciativa tem impactos adversos quanto à poluição sonora (HOLGUÍN-VERAS, 2015).

11. Realização de transferência do transporte de carga para modos mais limpos

(transferência modal): Trata-se da priorização do uso de modos de transportes que consomem menos energia, emitem menos poluentes atmosféricos e GEE, se comparados com o modo de transporte em uso corrente (OLIVEIRA, 2016; HOLGUÍN-VERAS, 2015). Segundo Holguín-Veras (2015), a implantação desta iniciativa pode levar a redução da distância percorrida, tanto por veículos pesados quanto por veículos leves, de 6% a 31%. Porém, esta adoção desta iniciativa implica em investimento inicial em infraestrutura e equipamentos, acarretando em despesas adicionais de manutenção (OLIVEIRA E D'AGOSTO, 2017; HOLGUÍN-VERAS, 2015).

12. Redução do peso dos veículos:

Trata-se da redução da tara dos veículos por meio da aplicação de inovação em seus projetos que considere o uso seguro de estruturas e/ou de materiais mais leves no chassi, na cabine ou na carroceria. Também é possível adotar esta iniciativa por meio da readequação, de forma segura, de equipamentos disponíveis em veículos em uso, em busca de eliminá-los ou substituí-los por outros mais leves. Assim, é necessário avaliar se o benefício em termos de redução do custo operacional, decorrente da redução de

consumo de combustível, compensa o investimento inicial e justifica a adoção desta iniciativa.

13. **Renovação e modernização da frota:** A substituição de parte ou da totalidade da frota dentro de sua vida útil econômica garante as condições de operação ideais dos veículos, além de agregar inovações tecnológicas que colaboram para a redução de custo operacional, do consumo de energia, da emissão de poluentes atmosféricos e de acidentes. A implantação desta iniciativa demanda investimento adicional para a aquisição de novos veículos, porém leva a uma redução nas despesas de manutenção.
14. **Treinamento dos motoristas (*Eco-driving*):** Trata-se de um programa de treinamento contínuo e periódico (em média a cada 3 meses) de motoristas, encarregados de operação de transporte, equipe de apoio administrativo e equipe de manutenção de veículos, com o objetivo de instruí-los sobre técnicas de direção econômicas, seguras e ambientalmente sustentáveis. Indo além da direção, esta iniciativa também pode incluir a adoção de tecnologias, como unidades de energia auxiliares e sistemas eletrificados de parada de caminhão, que auxiliam a reduzir a poluição causada pela prática de marcha-lenta (HOLGUÍN-VERAS, 2015). Com esta iniciativa, espera-se reduzir o consumo de energia, no caso de uso de combustíveis fósseis, e consequente redução na emissão de GEE e poluentes atmosféricos. Porém, este tipo de programa necessita de investimento inicial, além de despesas adicionais de manutenção (HOLGUÍN-VERAS, 2015; OLIVEIRA E D'AGOSTO, 2017).
15. **Utilização de aditivos para melhorar a eficiência energética dos combustíveis:** Consiste na utilização de substâncias que, se adicionadas aos combustíveis, têm a finalidade de potencializar as suas propriedades positivas sem modificar suas características, promovendo melhor queima e consequente redução de consumo. Assim, esta iniciativa contribui com a redução do consumo de energia fóssil, redução da emissão de GEE e de poluentes atmosféricos. Sua adoção demanda investimento inicial para a aquisição de aditivos.

- 16. Utilização de diferentes tipos de veículos para realização de entregas e coletas:** Trata-se da utilização de uma maior variedade de veículos para realização de entregas e coletas, a fim de diminuir o tempo de entrega e atender a necessidade dos clientes estabelecidos em áreas de restrições de veículos de médio e grande portes. Esta iniciativa pode considerar o uso de veículos motorizados de pequeno porte, como vans e furgões, e/ou veículos não motorizados, como triciclos e bicicletas. Porém, dependendo das condições operacionais e das exigências com o nível de serviço, esta iniciativa pode intensificar os congestionamentos de trânsito e promover um aumento dos impactos ambientais, dependendo do tipo de veículo a ser adotado. Sua adoção demanda tanto investimento inicial para a aquisição de diferentes tipos de veículos quanto despesa para sua manutenção. É necessário avaliar se os benefícios em termos de redução custo operacional decorrente da redução do consumo de energia (por utilização de veículos mais eficientes ou não motorizados) e dos tempos de operação compensam o investimento inicial e as despesas de manutenção.
- 17. Utilização de fontes de energia mais limpas:** Trata-se da utilização de fontes de energia alternativas, em qualquer modo de transporte e para qualquer sistema de propulsão, que proporcionam baixa emissão de poluentes atmosféricos e GEE no uso final, se comparado à fonte energia convencional, usualmente combustíveis derivados do petróleo. Tais fontes de energia podem ser fósseis, como o gás natural veicular e o gás liquefeito de petróleo ou dos biocombustíveis oriundos de fontes renováveis, tais como o biodiesel, o biogás, os álcoois e o diesel sintético, além da alternativa de uso da energia elétrica e do hidrogênio. A adoção desta iniciativa pode demandar investimento inicial para a adaptação dos veículos para uso de uma fonte de energia mais limpa ou para a própria aquisição desta fonte de energia.
- 18. Utilização de sistemas de informação para rastreamento e acompanhamento da frota:** Espera-se, com a adoção de sistemas de informação para rastreamento e acompanhamento da frota em tempo real, como Sistemas de Informações Geográficas (SIG), Sistemas de Tráfego Inteligentes (ITS), Sistema de Posicionamento Global (GPS) e Sistemas de Telemetria,

evitar congestionamentos, além da obtenção de dados para controle de abastecimento, quilometragem percorrida, horas trabalhadas, troca de pneus entre outros tipos de manutenção, a fim de aumentar a segurança do tráfego dos veículos e das cargas, bem como promover a economia de energia e a redução dos custos operacionais (OLIVEIRA, 2016; HOLGUÍN-VERAS, 2015). A adoção desta iniciativa demanda investimento inicial para aquisição de equipamentos e *softwares* necessários, além de despesas de manutenção. Logo, deve-se avaliar se estes investimentos são de fato compensados pelos benefícios esperados, em termos de redução de custo e tempo total de operação e aumento de segurança e confiabilidade (OLIVEIRA E D'AGOSTO, 2017; HOLGUÍN-VERAS, 2015).

19. Utilização de sistemas de propulsão alternativos: Trata-se da utilização de veículo com sistema de propulsão diferente do convencional (motor de combustão interna e sistema de transmissão mecânico), usualmente híbridos ou elétricos, visando à redução do consumo de energia na operação de transporte com impacto na redução da emissão de GEE e poluentes atmosféricos. A adoção desta iniciativa demanda investimento inicial para aquisição de veículos com sistema de propulsão não convencional, que usualmente são mais caros que os veículos convencionais. Assim, é necessário verificar se existe alguma forma de compensar este investimento com a redução de custos operacionais decorrente da redução do consumo de energia.

20. Utilização de veículos com maior eficiência energética: Consiste na utilização de veículo com sistema de propulsão convencional (motor de combustão interna e sistema de transmissão mecânico) que, em função de aprimoramentos incrementais no seu projeto (de fabricação), proporcionam menor consumo de energia para uma dada unidade de distância percorrida, carga transportada ou tempo de operação. A adoção desta iniciativa demanda investimento inicial para aquisição de veículos de melhor eficiência energética, sendo necessário então avaliar se a redução de custos operacionais decorrente da redução do consumo de energia de fato compensa este investimento inicial.

Verifica-se então que existe uma ampla gama de iniciativas com potencial de contribuir para sustentabilidade do TUC, cujo agente de implantação é o operador de transporte ou o embarcador. Entretanto, é importante destacar que os benefícios gerados pela adoção destas iniciativas dependem das características da operação de transporte urbano de carga. É fundamental conhecer as características do entorno da rota, o tipo de carga transportada, os veículos, vias e terminais utilizados, bem como os processos de carga, distribuição, descarga e controle envolvidos na operação. A partir destes dados, devem-se avaliar os benefícios e impactos reais que tais iniciativas trarão para a operação. Por exemplo, em uma operação de coleta de lixo em uma megacidade, com inúmeras paradas, baixa velocidade e submetida a grandes congestionamentos de tráfego, a implantação de treinamento dos motoristas (*eco-driving*) pode não trazer os benefícios esperados em termos de redução das emissões de GEE e de poluentes atmosféricos que em uma operação que tenha apenas um centro de distribuição para um único ponto de entrega (FERNANDES *et al.* c, 2015).

Enfim, a seleção das iniciativas a serem implantadas é um processo decisório complexo e abrangente, que envolve critérios de cunho quantitativo e qualitativo para avaliar os impactos sócio-ambientais e econômicos de cada iniciativa. Assim, é essencial que o agente, seja ele um operador de transporte ou embarcador, desenvolva uma análise comparativa destes critérios para identificar a iniciativa com maior potencial em termos de sustentabilidade para uma determinada operação, considerando um determinado cenário. Neste contexto, esta tese tem como objetivo desenvolver uma metodologia para avaliação da sustentabilidade de operações de transporte urbano de carga, sob a perspectiva de operadores de transporte. Portanto, a seção a seguir apresenta métodos de apoio à decisão que podem ser empregados para avaliação da sustentabilidade de sistemas de transporte.

2.3 Métodos de apoio à decisão adotados para avaliação da sustentabilidade de sistemas de transportes

São vários os métodos de apoio à decisão que podem ser empregados para identificar, comparar e selecionar configurações sustentáveis de sistemas de transporte. De acordo com Awasthi *et al.* (2011), as abordagens comumente usadas para avaliação da

sustentabilidade de sistemas de transporte são: Análise do ciclo de vida; Análise de custo-benefício e Análise de custo-efetividade; Avaliação de impacto ambiental; Otimização; Dinâmica de sistemas; Indicadores de transporte sustentável; Análise de dados; e Métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão.

A **Análise do ciclo de vida** (ACV, em inglês LCA- *Life cycle assessment*) tem como objetivo avaliar o impacto ambiental de um produto ou serviço ao longo de sua vida, considerando todas as suas fases, desde a sua construção até o fim de vida desse sistema (ANDRADE, 2016). Entretanto, segundo Awasthi *et al.* (2011), a ACV usualmente não leva em consideração impactos sociais, de modo que esse método não está relacionado ao problema de pesquisa desta tese.

Na **Análise de custo-benefício** (em inglês CBA - *Cost-benefit analysis*), são comparados, entre projetos diferentes, os custos totais esperados com os benefícios de um projeto, de maneira a determinar a alternativa mais favorável (MIYABUKURO, 2014). A **análise de custo-efetividade** (em inglês CEA - *Cost-effectiveness analysis*) também compara os custos e benefícios de um determinado projeto. Os benefícios, porém, não são expressos em unidades monetárias, e sim em unidades de resultado, permitindo agregar variáveis de difícil mensuração monetária, tal como as externalidades (LANG, 2007). Entretanto, as dificuldades para estimar os custos e benefícios de um projeto, em especial custos sociais (como os decorrentes de poluição, ruído, acidentes e congestionamento), bem como as incertezas que os cercam, dificultam a aplicação destes métodos para análises de sustentabilidade (MARAVAS *et al.*, 2012).

A **Avaliação de impacto ambiental** (do inglês EIA - *Environmental impact assessment*) é um método padronizado que consiste em uma série de procedimentos legais, institucionais e técnico-científicos, com o objetivo de caracterizar e identificar impactos potenciais na implantação futura de um sistema de transportes, considerando os três pilares da sustentabilidade (BITAR E ORTEGA, 1998). Porém, este método tem maior aplicação para a avaliação dos impactos ambientais de uma nova fonte de poluição, tal como uma indústria ou uma estrada (WOOD, 2002; AWASTHI *et al.*, 2011), não sendo assim a alternativa mais indicada para analisar o impacto de diferentes operações de transporte, tal como proposto nesta tese.

Awasthi *et al.* (2011) reforçam que a sustentabilidade de projetos de transportes também pode ser analisada por meio de **modelos matemáticos de otimização** ou **modelos de dinâmica de sistemas**. No contexto da sustentabilidade de transporte, um modelo de otimização tenta encontrar uma solução ótima sob as restrições de objetivos socioeconômicos e ambientais, sendo a programação linear comumente usada (AWASTHI *et al.*, 2011). Por sua vez, a Dinâmica de Sistemas é adotada para a modelagem de sistemas complexos, de modo que esses modelos possam projetar e avaliar uma relação de causa e efeito em um sistema integrado de transporte sustentável (TAO E HUNG, 2003). Os autores também destacam a possibilidade de **análise de dados** para avaliar a sustentabilidade de transportes, por meio da aplicação de técnicas estatísticas, como testes de hipóteses e modelagem de equações estruturais (AWASTHI *et al.*, 2011).

Modelos de indicadores de avaliação usam indicadores de transporte sustentável para avaliar a sustentabilidade de sistemas de transporte. Tao e Hung (2003) classificam estes modelos em três categorias: (i) modelos de índices compostos, cujo resultado é um índice global que representa os impactos ou o desempenho socioeconômico e ambiental, tal como a pegada ecológica; (ii) modelos de índices multi-níveis, cujo resultado é uma série de indicadores que representam diferentes objetivos e hierarquias; e (iii) modelos de matrizes multidimensionais, nos quais a interação entre diferentes indicadores é definida por meio de arquiteturas lógicas. Os primeiros deste tipo de modelos foram introduzidos na década de 1990, denominados modelos estado-resposta (*State Response models*) (AWASTHI *et al.*, 2011).

Por sua vez, os **métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão** não conduzem a uma solução ótima, mas auxiliam os tomadores de decisão a incluir suas preferências junto às alternativas selecionadas (LEITE E FREITAS, 2012). Eles permitem considerar critérios qualitativos e quantitativos no processo de análise, ao mesmo tempo em que permitem incorporar a experiência e preferência dos tomadores de decisão (LISBOA, 2002).

Vários métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão têm sido empregados para avaliar a sustentabilidade de projetos de transporte, uma vez que muitas características

ambientais e sociais são de natureza qualitativa ou subjetiva, o que torna difícil sua mensuração e/ou avaliação (AWASTHI *et al.*, 2011). São eles: ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité*); PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method*); Método de Análise Hierárquica - MAH (*Analytic Hierarchy Process - AHP*); Abordagem de Decisão Fuzzy (FDA – *Fuzzy Decision Approach*); MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*); TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*); TODIM (Tomada de Decisão Interativa e Multicritério); MAVT (*Multi-Attribute Value Function Theory*); e MAUT (*Multi Attribute Utility Function Theory*) (RIBEIRO, 2000). Estes métodos possuem particularidades que os tornam relevantes para alguns tipos de casos e aplicações, porém com desvantagens em outros casos (FILIPPO, 2008).

Os tradicionais métodos multicritérios de apoio à decisão consideram a importância dos indicadores como determinística e independente. Entretanto, esta é uma limitação destes métodos, devido à dificuldade dos decisores em avaliar a importância dos critérios por pesos em uma escala numérica discreta. Assim, a adoção de termos linguísticos, como bom e muito bom, torna a tomada de decisão mais viável e conveniente para especialistas, mas também agrega a incerteza e a imprecisão a este processo (EGILMEZ *et al.*, 2015).

Portanto, outros métodos, combinando métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão e Inteligência Artificial, têm sido empregados para o desenvolvimento de metodologias para sistemas de apoio à decisão baseado no conhecimento. Por meio da combinação de métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão com a teoria da lógica *fuzzy* (ZADEH, 1983), foram desenvolvidos novos métodos como o **método hierárquico-fuzzy**, que combina conceitos da AHP e da lógica *fuzzy* (SIMOS, 1990; AWASTHI *et al.*, 2011). Filippo (2008) destaca uma tendência de aumento da utilização da lógica *fuzzy*, combinada com outras técnicas, em processos de tomada de decisão que envolvam parâmetros não só de caráter técnico e econômico, mas também de caráter ambiental. Isto se deve ao fato de que problemas ambientais tendem a ser modelados por variáveis quantitativas e qualitativas, que costumam apresentar incerteza e vaguez em suas avaliações (FILLIPO, 2008). Dalalah *et al.* (2011) e Egilmez *et al.*, (2015) também destacam que métodos hierárquicos-*fuzzy* têm sido amplamente aplicados como uma alternativa mais robusta e conveniente aos métodos multicritérios

de apoio à tomada de decisão (DALALAH *et al.*, 2011). Assim, dado a importância que o método hierárquico-*fuzzy* tem ganhado para avaliação de decisões que envolvam tanto critérios objetivos e quantitativos quanto critérios subjetivos e qualitativos, tal como costuma ser na avaliação de sustentabilidade de sistemas de transporte, apresentam-se, nas subseções a seguir, os principais conceitos do método de análise hierárquica e da lógica *fuzzy*.

2.3.1 Método de Análise Hierárquica (MAH)

O Método de Análise Hierárquica, desenvolvido por Tomas Saaty nos anos 70, tem sido o método multicritério de apoio à decisão mais empregado devido à sua flexibilidade, simplicidade no uso e fácil entendimento (MARINS *et al.*, 2009). A ideia central da teoria da análise hierárquica introduzida por Saaty é a redução do estudo de sistemas a uma sequência de comparações aos pares.

Saaty (1980) destaca que o benefício do MAH é lidar com aspectos qualitativos e quantitativos de um problema de decisão, uma vez que os valores dos julgamentos das comparações paritárias são baseados em experiência e intuição, bem como em dados físicos. Ainda, de acordo com Gradzol (2005), o MAH, ao reconhecer que participantes podem estar incertos ou fazer julgamentos pobres em algumas comparações, envolve comparações redundantes para melhorar a sua validade. O autor (2005) adverte que esta tolerância a inconsistências não é uma limitação do método, porém um retrato da realidade.

Salomon *et al.* (1999) compararam o MAH com outros métodos multicritérios de apoio à decisão, concluindo que os resultados obtidos pelos diferentes métodos, na maioria das vezes, foram considerados similares e diversas vantagens da aplicação do MAH foram observadas em todos casos.

O MAH procura reproduzir o raciocínio humano na avaliação comparativa dos elementos de um conjunto, com base na percepção de analistas. A aplicação do método produz como resultado a atribuição de pesos a objetivos e alternativas, por meio da comparação par a par dos elementos (SAATY, 1980). Ao final, obtém-se um valor único para cada alternativa (que varia entre 0 e 1), que agrega todos os critérios, considerando a importância e a classificação para cada um deles (FILIPPO, 2008). Estes

resultados são apresentados sob a forma de prioridades, sendo assim possível avaliar o quanto uma alternativa é superior à outra de um ponto de vista global (SAATY & VARGAS, 2005).

A aplicação do MAH é estruturada em três etapas: (i) construção de hierarquias, onde o problema é estruturado em níveis hierárquicos, no qual o primeiro nível corresponde ao propósito geral, o segundo nível se refere aos critérios e o terceiro as alternativas (Figura 2.2); (ii) definição de prioridades, onde deve ser procedido o julgamento par a par para os elementos da hierarquia, atribuindo-lhes valores de 1 a 9 conforme a escala de Saaty (Tabela 2.1) em uma matriz de julgamento; seguido da normalização das matrizes de julgamento, o cálculo das prioridades médias locais e das prioridades globais; e (iii) análise do grau de consistência lógica, que trata de uma medida da precisão ou consistência dos julgamentos realizados (a Razão de Consistência dos julgamentos – RC- que deve ser inferior a 0,1) (SAATY, 2000; MARINS *et al.*, 2009).

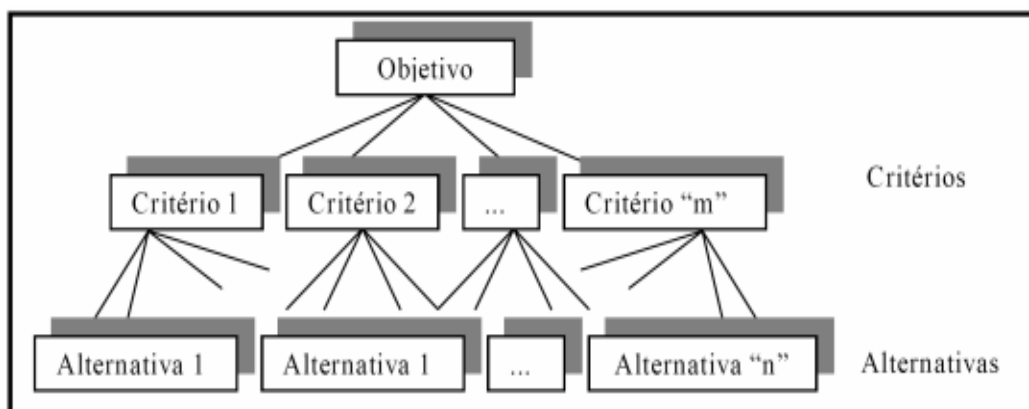


Figura 2.2: Estrutura Hierárquica Básica AHP

Fonte: Saaty (2000).

Tabela 2.1: Escala numérica de Saaty

Escala Numérica	Escala Verbal
1	Elementos são igualmente preferíveis
3	Moderada importância de um elemento sobre o outro
5	Forte importância de um elemento sobre o outro
7	Importância muito forte de um elemento sobre o outro
9	Extrema importância de um elemento sobre o outro
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários entre as opiniões adjacentes

Fonte: Saaty (1980)

Uma das limitações do método é que a escala de 1-9, apresentada na Tabela 2.1, é potencialmente inconsistente internamente, uma vez que a ligação entre os pontos na escala e as descrições verbais correspondentes não têm fundamentação teórica. Assim, os tomadores de decisão quando se deparam com situações idênticas de decisão podem derivar hierarquias diferentes, obtendo então diferentes soluções. Além disto, dependendo do problema, o número de comparações requeridas pode ser muito alto, bem como a introdução de novas opções pode mudar a posição relativa de algumas das opções originais (BOAS, 2006).

2.3.2 Lógica Fuzzy

A lógica *fuzzy*, desenvolvida por Lofti Zadeh na década de 60, tem como base o tratamento matemático de sistemas onde a subjetividade e as características ambíguas das variáveis processadas dificultam a modelagem e aplicação da lógica clássica (FILIPPO, 2008). Assim, a característica fundamental da lógica *fuzzy* é a possibilidade de quantificar as ambiguidades do pensamento humano, que não podem ser expressas por meio da lógica clássica (CRUZ, 2011). Dentre os principais benefícios da aplicação da lógica *fuzzy*, Silva e Maia (2004) destacam a flexibilidade no tratamento de variáveis qualitativas e/ou quantitativas.

Uma variável, segundo a lógica *fuzzy*, tem “n” estados, cada um com diferentes graus de associação ou de pertinência, gerando assim os conjuntos *fuzzy*, que não possuem limites bem definidos. No processo de “fuzzificação”, os conjuntos *fuzzy* são gerados pela associação de um vetor linguístico aos possíveis valores de entrada por meio de funções de pertinência, podendo este processo ser auxiliado por especialistas. Após o uso das regras e dos procedimentos de inferência, o vetor linguístico *fuzzy* é convertido em um valor numérico (*crisp*) de saída, no chamado processo de “defuzzificação”, que pode ser realizado por métodos como o centróide e centro dos máximos (FILIPPO, 2008). Assim, um sistema *fuzzy* consiste de uma base de regras, de funções de pertinências e de procedimentos de inferência, conforme apresentado na Figura 2.3.

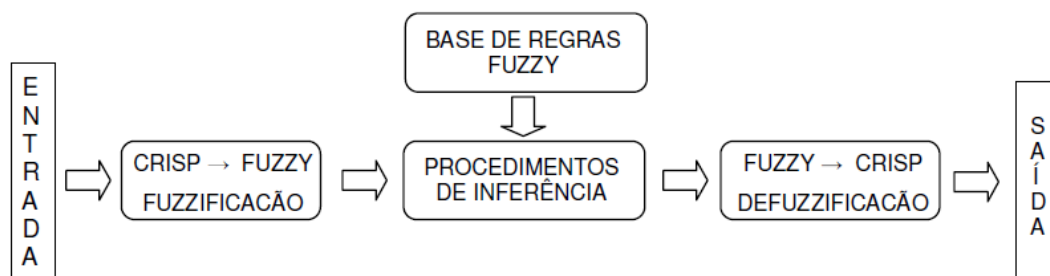


Figura 2.3: Estrutura geral de um sistema de inferência *fuzzy*

Fonte: Cury, 1999.

O primeiro passo na computação de um sistema *fuzzy* é o processo de fuzzificação, que consiste no processo de transformação do *input* em graus de pertinência, ou de certeza no conceito, produzindo uma interpretação ou adjetivação do *input* (GOUDARD, 2001). Neste processo, a base de regras *fuzzy* é um componente crítico, pois contém as informações que relacionam as condições de *input*, que pode ser um valor preciso (quando deriva de um processo de medição) ou um conjunto *fuzzy* (obtido por meio de questionários ou por opiniões de especialistas), com as respostas de *output* (CURY, 1999).

Os conjuntos *fuzzy* podem ser representados por diferentes funções, sendo as triangulares e trapezoidais as mais empregadas devido à simplicidade de utilização (CRUZ, 2011). Após a fuzzificação dos *inputs*, prossegue-se com o processo de inferência. As regras de inferência *fuzzy* normalmente são expressas no formato “Se-Então” e combinam diferentes técnicas de implicação e de agregação, utilizando relações *fuzzy*. Uma das técnicas mais utilizadas é a chamada inferência max-min, que utiliza o Método Mamdani de Inferência *Fuzzy* (FILIPPO, 2008). O resultado de uma inferência *fuzzy* é o vetor linguístico, que apresenta um grau de pertinência inferido para cada termo linguístico definido para a variável de saída, tornando, assim, o sistema pronto para o processo de defuzzificação (CURY, 1999).

O processo de defuzzificação consiste na transformação do resultado *fuzzy* (vetor linguístico) produzido no processo de inferência *fuzzy* em um resultado escalar, que é útil quando se deseja comparar resultados entre várias opções ou simplesmente ordená-

los. Os métodos de defuzzificação mais utilizados são: centro dos máximos, centroide e média dos máximos (FILIPPO, 2008).

3 PROPOSTA DE INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE PARA TRANSPORTE URBANO DE CARGA

Sistema é um conjunto de componentes que atuam na execução de um objetivo comum em um determinado ambiente. O desempenho de um sistema é o resultado da combinação de seus atributos, relacionados com sua finalidade ou essência. A avaliação de desempenho aborda um conjunto de procedimentos que permitem descrever, avaliar e analisar o atendimento a determinados requisitos de uma atividade, utilizando critérios pré-definidos e visando à melhoria desta atividade, com o objetivo de: (i) verificar se o sistema está atingindo seu objetivo; (ii) controlar o sistema para diagnosticar problemas e antecipar soluções; (iii) avaliar e aprimorar o nível de serviço; e (iv) auxiliar na tomada de decisão (OLIVEIRA E D'AGOSTO, 2017).

Um sistema de transporte, cujo objetivo consiste em promover o deslocamento de pessoas e cargas, é composto por quatro componentes básicos: via, veículo, terminal e controle. Esse sistema considera a atuação de diferentes agentes, tais como: o operador de transporte (empresas transportadoras, cooperativas de transporte, transportadores autônomos, operadores de transporte multimodal etc.); o embarcador; o poder público; e a sociedade. Assim, o desempenho de um sistema de transporte pode ser avaliado sob o ponto de vista destes diferentes agentes, considerando diferentes aspectos. Numa visão abrangente, que vise à sustentabilidade da atividade do transporte de carga, devem-se considerar os aspectos econômicos, ambientais e sociais.

Tendo definidos os aspectos a serem avaliados, devem ser definidos os atributos, os indicadores e as medidas de desempenho a serem considerados para a avaliação de um sistema de transporte. De acordo com os autores, os atributos de um sistema se referem às características associadas a este sistema, porém podem representar ideias diferentes, dependendo de quem os interpreta. Indicadores são representações matemáticas de um processo ou de um resultado, tendo normalmente uma meta associada, enquanto medidas são combinações de indicadores usados para avaliar os atributos do sistema cujo desempenho se deseja avaliar (OLIVEIRA E D'AGOSTO, 2017).

As atividades desenvolvidas em uma operação de transporte urbano de carga provocam diversos impactos de cunho social, econômico e ambiental para as cidades e a

população urbana. Deste modo, é fundamental a busca por configurações em prol da sustentabilidade do TUC. Neste contexto, esta tese propõe uma metodologia para avaliar o desempenho de atividades de transporte urbano de carga, sob o ponto de vista do operador de transporte, considerando os aspectos da sustentabilidade (econômicos, ambientais e sociais) com intuito de auxiliar no processo de tomada de decisão. Portanto, um passo importante é a definição dos indicadores e medidas a serem considerados no processo de avaliação da sustentabilidade das atividades do transporte urbano de carga, que também podem ser adotados no processo de controle e acompanhamento dessas atividades.

Litman (2008) define indicadores como variáveis específicas, adequadas para quantificação e análise. Um indicador deve fornecer informações confiáveis de maneira simples e objetiva, além de ser facilmente compreensível, razoável, mensurável, possível de quantificar, acessível e abrangente, ser independente e padronizado para comparação, além de claramente definido para capturar processos de longo prazo (HAGHSHENAS E VAZIRI; 2012). Füssler *et al.* (2016) complementam que um conjunto de indicadores deve ser relevante, consistente, transparente, preciso, acessível, eficiente em custos e frequente.

A seleção de indicadores deve ter como base as questões que estes buscam responder (JOURDARD E GUDMUNDSSON, 2010; HAGHSHENAS E VAZIRI, 2012). Ainda, Gomes *et al.* (2000) destacam que, no processo de seleção de indicadores, é fundamental considerar: a disponibilidade de dados; a possibilidade de calibração; a possibilidade de comparação com critérios legais ou com padrões e metas existentes; a facilidade e rapidez de determinação e interpretação; a sensibilidade do público alvo; e um custo razoável de implementação.

Para Litman (2008), os indicadores devem ser compreensíveis para o público em geral e útil para os tomadores de decisão, sendo que sua utilidade e valor podem variar em importância entre as diferentes fases de um projeto, jurisdições e as partes interessadas. Em geral, os indicadores são úteis no processo de tomada de decisões, para monitorar o progresso e para *benchmarking* (EGILMEZ *et al.*, 2015).

Nesse contexto, os indicadores podem ser uma ferramenta poderosa para monitorar a sustentabilidade dos transportes (HAGSHENAS E VAZIRI, 2012) e, conseqüentemente, para auxiliar os operadores de transporte a avaliar sustentabilidade do transporte urbano de carga (TUC). Indicadores de sustentabilidade de transportes já foram propostos, no passado, por diferentes pesquisadores, porém esses estudos não consideraram o TUC. Para confirmar tal suposição, foi seguido o procedimento proposto por Thomé *et al.* (2016) para o desenvolvimento de uma revisão bibliográfica sistemática (apresentada na seção 3.1), com o objetivo de responder as duas primeiras questões de pesquisa desta tese: (i) Quais são os critérios que os operadores de transporte devem avaliar para selecionar a iniciativa de TUC mais indicada para aumentar seu nível de sustentabilidade?; e (ii) existem indicadores ou um índice que permitam esta análise?

A RBS adota uma metodologia padronizada, com procedimentos de busca, seleção e análise bem delineados e claramente definidos, que podem ser replicados e aprimorados quantas vezes forem necessárias (OLIVEIRA, 2016). Tem como base a exaustão na busca das pesquisas analisadas, a seleção justificada destas pesquisas por critérios de inclusão e exclusão explícitos e a avaliação da qualidade metodológica (LIMA *et al.*, 2000).

Portanto, com intuito de identificar as publicações existentes sobre indicadores de sustentabilidade para o TUC e verificar se tais pesquisas propõem um índice composto para esta avaliação, adotou-se como método de pesquisa a RBS, devido ao seu objetivo de desenvolver uma conceituação holística e síntese de um tópico emergente (no caso, indicadores de sustentabilidade para o TUC), de modo a fornecer resultados para reinterpretar pesquisas prévias ou promover um primeiro passo para futuras pesquisas sobre o tema (SEURING E GOLD, 2012). Assim, a seção a seguir apresenta os passos adotados e os resultados desta revisão bibliográfica. O resultado desta pesquisa, em associação aos resultados de uma pesquisa bibliográfica narrativa sobre indicadores de sustentabilidade para o transporte em geral, foi a base para a proposta de um conjunto de indicadores de sustentabilidade para o TUC, classificados segundo o impacto social, ambiental e econômico, conforme apresentado neste capítulo.

3.1 Revisão bibliográfica sistemática sobre indicadores de sustentabilidade para o transporte urbano de carga

Para desenvolvimento da revisão bibliográfica sistemática, seguiu-se a metodologia proposta por Thomé *et al.* (2016). Para os autores, a revisão bibliográfica sistemática deve ser estruturada em oito etapas: (i) formulação do problema de pesquisa; (ii) pesquisa de literatura; (iii) coleta de dados; (iv) avaliação de qualidade; (v) análise e síntese de dados; (vi) interpretação; (vii) apresentação dos resultados; e (viii) revisão de atualização.

Considerando a formulação do problema de pesquisa (etapa 1), a aplicação deste método na presente tese é realizada de forma a atender ao primeiro objetivo secundário (seção 1.2), que visa: identificar os principais critérios que devem ser avaliados por operadores de transporte para selecionar, entre alternativas de operação de TUC, aquela com maior nível de sustentabilidade.

A pesquisa de literatura foi realizada nas bases de indexações *ISI Web of Science* e *SCOPUS* devido a sua extensa literatura revisada por pares e porque estas são as fontes de dados mais comuns em análises bibliométricas, como discutido em Mongeon e Paul-Hus (2016).

As palavras-chave e suas combinações utilizadas para identificação dos estudos foram definidas de forma suficientemente ampla a fim de evitar uma limitação artificial nos documentos levantados, porém com limites para excluir dados indesejados (FONTAINHA, 2018). Adotou-se a seguinte combinação de palavras-chave para o processo de busca: *((sustainab* AND urban freight transport* AND (index OR indicator))* (sustentabilidade e (transporte urbano de carga) e (índice ou indicador)) (Figura 3.1). A combinação de termos: *sustainab* AND urban freight transport** possibilitou a identificação de estudos que tratam da temática de sustentabilidade no transporte urbano de carga. O objetivo de complementar esses termos com o operador booleano "e" mais os termos "índice" ou "indicadores" é restringir a busca a publicações que realmente se concentrem na proposta de índices ou indicadores de sustentabilidade para este tipo operação.

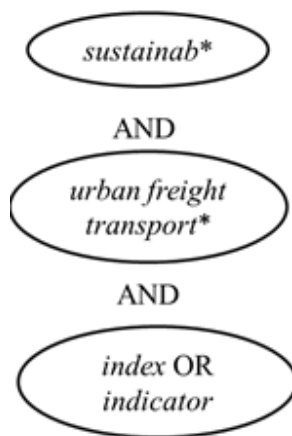


Figura 3-1: Resultados da etapa de busca da literatura

Aplicou-se a busca das palavras-chave no título, no resumo e nas palavras-chave dos artigos, considerando-se os últimos dez anos como o período para realização da pesquisa (2007 a 2017). Ainda, por se entender que o tema é importante para a economia de qualquer país, não foi adotada uma delimitação específica em termos geográficos.

A busca foi restrita a artigos de língua inglesa publicados em periódicos internacionais indexados e revisados por pares. Entretanto, a busca foi estendida com a inclusão dos periódicos *Transportation Research Procedia* e *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, que focam na publicação de artigos apreciados e selecionados para apresentação em congressos internacionais. A inclusão de tais periódicos busca evitar um possível viés de publicação no que tange iniciativas em primeiros estágios de desenvolvimento, uma vez que seus processos de avaliação ocorrem em um menor espaço de tempo do que aos periódicos indexados, de modo que possibilita a consulta de pesquisas mais recentes. Porém, não foram consideradas as demais fontes de literatura *gray*, como livros, relatórios, teses, dissertações e demais artigos publicados em conferências. Esta é uma limitação deste estudo que pode implicar em um viés de publicação no que tange canais de publicação periféricos e alternativos (FONTAINHA, 2018).

Para o desenvolvimento das RBS, foram definidos os seguintes critérios de exclusão a fim de filtrar os documentos recuperados na pesquisa: artigos cujo conteúdo estava relacionado ao TUC, mas não se concentravam especificamente na avaliação da sustentabilidade, não foram considerados. Este critério de exclusão foi aplicado na

revisão dos resumos e na revisão de texto completo, seguido pela aplicação do método de *snowball*, que consiste em verificar trabalhos referenciados pelos autores e outras obras que citam esses documentos, conforme indicado por Thomé *et al.* (2016).

Inicialmente, foram identificados sete artigos na base Scopus e 11 artigos na base ISI *Web of Science*, mas a exclusão de publicações duplicadas (já que a busca foi realizada em mais de uma base de dados) resultou em 14 artigos. O processo de revisão do título e resumo culminou com a seleção de três artigos para leitura completa. Contudo, todos os artigos foram eliminados, de acordo com os critérios de exclusão apresentados, por não tratarem diretamente da proposta de indicadores de sustentabilidade ou de um índice para a avaliação da sustentabilidade de operações de transporte urbano de carga, confirmando assim a carência de estudos sobre o tema e ressaltando o caráter inovador da presente tese. Os resultados dessa etapa são resumidos na Tabela 3.1 e na Figura 3.2.

Tabela 3.1: Resultados da etapa de busca da literatura

Base de dados	Artigos identificados (após a busca)	Artigos após a exclusão de duplicados	Artigos selecionados (após leitura de título e resumo)	Artigos incluídos na RBS (após leitura completa)
<i>Web of Science</i>	11	11	3	0
Scopus	7	3	0	0
Total	18	14	3	0

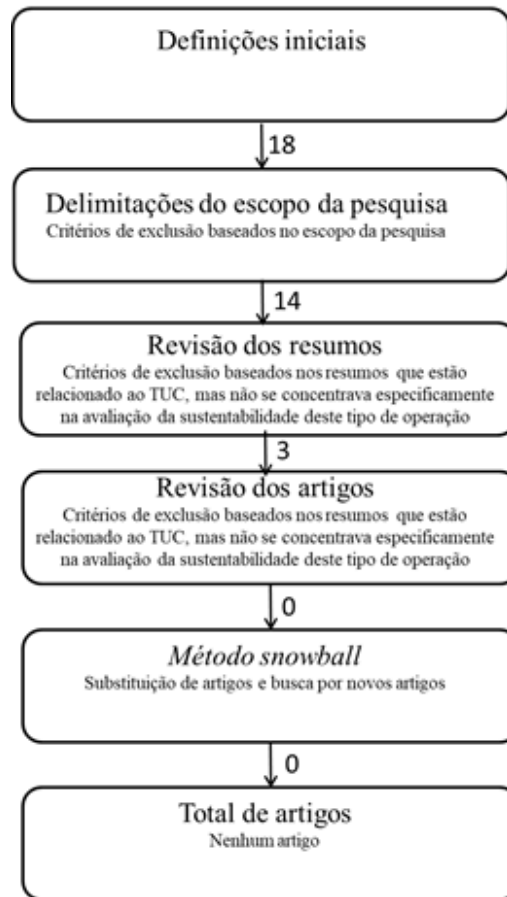


Figura 3-2: Resultados da etapa de busca da literatura

Durante o processo de coleta de dados, as informações obtidas foram registradas com base na técnica de análise de conteúdo, em um banco de dados, a fim de facilitar a classificação, investigação e avaliação dos estudos analisados. A avaliação da qualidade foi assegurada pela utilização de artigos revisados por pares, tipo de documento com elevada qualidade conforme indicado por Thomé *et al.* (2016). A apresentação dos resultados é compilada na tese e a sugestão de pesquisas futuras inclui a atualização das revisões da literatura conduzidas nesta pesquisa, completando assim o oitavo e último passo de uma RBS, conforme definido por Thomé *et al.* (2016).

3.2 Revisão da literatura sobre indicadores de sustentabilidade para o transporte

Devido aos resultados da RBS, apresentados na seção 3.1, optou-se por ampliar o escopo da revisão de literatura, considerando publicações sobre indicadores de sustentabilidade de transporte de forma geral. Contudo, foi excluída a restrição de artigos que consideravam apenas o TUC, estendendo a busca para publicações sobre

indicadores de sustentabilidade para qualquer tipo de transporte, com o objetivo de identificar uma lista de indicadores que pudesse ser adaptada para avaliar a sustentabilidade de operações de transporte urbano de carga. Esse resultado apoiaria a proposta de indicadores de sustentabilidade para o TUC. Entretanto, esta revisão complementar seguiu o método de uma revisão bibliográfica narrativa.

De acordo com Santos e Ribeiro (2013), tradicionalmente os estudos sobre indicadores de transporte sustentável (do inglês *sustainable transport indicators* – STI) priorizavam o componente ambiental da sustentabilidade. Os autores reforçam que apenas pesquisas mais recentes apresentam um maior equilíbrio entre indicadores de cunho ambiental, econômico e social, porém poucos estudos definem diretamente indicadores de transporte sustentável. Reisei *et al.* (2014) também destacam o número limitado de estudos que agregam diferentes indicadores de transporte sustentável em um único índice, como se pretende propor nesta tese para o transporte urbano de carga.

Haghshenas e Vaziri (2012) analisaram 17 publicações sobre indicadores transporte sustentável (NEWMAN E KENWORTHY, 1999; NICOLAS *et al.*, 2003; GILBERT *et al.*, 2003; HERZI E HASAN, 2004; JEON AND AMEKUDZI, 2005; ZEGRAS, 2006; SAVELSON E COLMAN, 2008; MOLES *et al.*, 2008, LITMAN, 2008; APPLETON E DAVIES, 2008; LI *et al.*, 2009; LITMAN, 2009A, B; CASTILLO E PITFIELD, 2009; DOODY *et al.*, 2009; TANGUAY *et al.*, 2010; e MASCARENHAS *et al.*, 2010), agrupando-os em três categorias: ambiental; econômico e social. Os autores identificaram 85 indicadores, que foram adotados 197 vezes (frequência de uso). Os indicadores econômicos são os mais difundidos, com uma frequência de uso de 90, enquanto os indicadores sociais e econômicos foram usados 59 e 48 vezes, respectivamente. A Tabela 3.2 apresenta os indicadores identificados por Haghshenas e Vaziri (2012) que apresentavam frequência de uso superior a três. Contudo, destaca-se que nenhum destes está relacionado ao transporte urbano de carga.

Tabela 3.2: Indicadores de transporte sustentável mais aplicados

Indicadores de sustentabilidade para o transporte (STI)	Frequência de uso
Ambiental	
Emissões de poluentes atmosféricos locais (CO, MP, NOx etc. kg per capita)	12
Emissão de GEE oriundos do transporte (CO ₂ -CH ₄ t per capita)	12
Consumo de energia para o transporte per capita	9
Ocupação territorial de infraestrutura de transportes (rodovias, estacionamentos)	9
População exposta a ruídos > 55 dbA	9
Consumo total de energia renovável per capita por ano	4
Econômico	
Gastos domiciliares alocados ao transporte (% do orçamento doméstico)	10
Gastos alocados ao transporte pelo governo local (anual, por PIB)	6
Tempo total perdido no trânsito	5
Social	
Fatalidades e feridos em acidentes de trânsito per capita	14
Acesso ao transporte público (população que tem acesso ao transporte público, perto de uma estação de trem, metrô ou ponto de ônibus)	11
Satisfação dos cidadãos, diversidade e qualidade dos serviços de transporte	4
Qualidade do transporte especial para pessoas com necessidades especiais, crianças e idosos	4

Fonte: Haghshenas e Vaziri (2012)

Os estudos analisados por Haghshenas e Vaziri (2012) foram publicados entre 1999 a 2010. Porém, estudos mais recentes também não consideraram o transporte urbano de cargas em suas propostas de indicadores de sustentabilidade para o transporte.

Awasthi e Chauhan (2011) apresentaram uma abordagem de tomada de decisão integrada baseada no Método de Análise Hierárquica - MAH (*Analytic Hierarchy Process* - AHP) para analisar como medidas de transporte, tal como um sistema compartilhamento de veículos (*carsharing*) ou soluções de transporte multimodais, impactam a sustentabilidade da cidade, propondo um índice composto por nove critérios. No entanto, nenhum destes critérios está relacionado ao transporte urbano de carga, tampouco a pesquisa analisa as operações de transporte em si, mas medidas de transporte. Agregando a incerteza a este processo de tomada de decisão, Awasthi *et al.* (2011) adotaram o método TOPSIS-fuzzy para avaliar, sob o ponto de vista de planejadores de transporte, a sustentabilidade de sistemas de transporte urbano, como *carsharing* e *park-and-ride*. No entanto, os critérios e alternativas consideradas também não abordam o TUC.

Haghshenas e Vaziri (2012) propõem um índice composto por nove indicadores de transporte sustentável, porém com o objetivo de avaliar e comparar a sustentabilidade do sistema de transporte de cidades de vários países. Este índice foi adotado por Haghshenas *et al.* (2015) como base para desenvolver um modelo de dinâmica de sistemas para avaliar o impacto de diferentes políticas de transportes na sustentabilidade urbana. Contudo, ambas as pesquisas consideraram indicadores relacionados ao transporte urbano de carga.

Shiau e Liu (2013) propuseram um conjunto de indicadores para auxiliar as autoridades locais a medir o nível de sustentabilidade do transporte urbano. Inicialmente, os autores categorizaram 21 indicadores em quatro aspectos (economia, meio ambiente, sociedade e energia), mas apenas dois destes indicadores estavam relacionados ao TUC. São eles: "carregamento do veículo de carga" e "efeito do depósito público no transbordo de carga". Aplicou-se então o Método de Análise Hierárquica - MAH (*Analytic Hierarchy Process* - AHP) para selecionar dez indicadores-chave para medir as estratégias de transporte sustentável a serem implementadas em Taipei, Taiwan. Entretanto, essa lista final não incluiu indicadores ou estratégias de transporte relacionadas ao TUC.

Reisei *et al.* (2014) utilizaram análise de componentes principais/ análise fatorial (do inglês, *principle component analysis/factor analysis* - PCA / FA) para desenvolver um índice composto para avaliar a sustentabilidade do transporte urbano em “áreas estatísticas locais” (do inglês *statistical local areas*, uma divisão administrativa dos municípios australianos), permitindo assim uma avaliação comparativa que ajudaria no planejamento de transporte em Melbourne, Austrália. O índice proposto é baseado em nove indicadores, mas nenhum deles relacionado ao TUC.

Ignaccolo *et al.* (2016) propõem uma metodologia para avaliar um indicador de “Dependência de Energia dedicada ao transporte” de uma área urbana, tendo como base dados socioeconômicos e de fluxos de demanda de transporte segundo o motivo da viagem na escala da zona de tráfego e um modelo de energia. Contudo, o transporte urbano de carga não foi considerado na modelagem proposta por Ignaccolo *et al.* (2016).

Rajak *et al.* (2016) propõe um modelo *fuzzy* para avaliar o nível de sustentabilidade do transporte urbano, com base em 60 indicadores. No entanto, apenas um desses indicadores está relacionado ao transporte urbano de carga (momento de transporte em t.km).

Oses *et al.* (2017) desenvolveram um modelo matemático, com base em métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão, a fim de propor um índice para avaliar a sustentabilidade do transporte urbano de qualquer cidade, que permite comparar os benefícios que serão atingidos por meio da implementação de estratégias e políticas de transportes. O índice proposto por Oses *et al.* (2017), que foi aplicado na cidade de San Sebastian – Espanha, é medido por meio de um conjunto de 45 indicadores gerais associados à sustentabilidade do transporte urbano. Destes, sete indicadores estão relacionados à implantação de estratégias e políticas relacionadas ao TUC. Porém, tais indicadores estão relacionados à avaliação da sustentabilidade deste tipo de transporte.

A Tabela 3.3 consolida os principais indicadores de transporte sustentável, propostos em pesquisas prévias, que podem ser adaptados ao TUC, bem como sua frequência de uso.

Tabela 3.3: Indicadores de transporte sustentável propostos em pesquisas prévias e podem ser adaptados ao TUC

Categorias		Indicadores	Autor/ano																		Número de vezes que aparece nos estudos
			OECD (1999)	Appleton and Davies (2008)	Litman (2008)	Pitfield and Castillo (2010)	Jourmand and Gudmundsson (2010)	Litman (2011)	Toth-Szabo et al. (2011)	Kim and Han (2011)	Awasthi and Chauhan (2011)	Zito e Salvo (2011)	Awasthi et al. (2011)	Haghshenas and Vaziri (2012)	Santos and Ribeiro (2013)	Shiau and Liu (2013)	Reisei et al. (2014)	Haghshenas et al. (2015)	Ignaccolo et al. (2016)	Rajak et al. (2016)	
Ambiental	Emissões de GEE (CO ₂ eq)	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X		X	X	17	
	Emissões de poluentes atmosféricos locais (CO, NO _x , PM ₁₀)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	18	
	Poluição sonora (dBA)	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X				X	X	14	
	Consumo de energia de origem fóssil	X		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X		X	15	
	Consumo de energia alternativa e/ou renovável	X		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X		X	15	
Econômica	Taxa de ocupação														X					1	
	Custo total de transporte			X		X				X	X	X	X	X			X			8	
	Tempo gasto em congestionamento												X				X		X	3	
	Produtividade											X								1	
Social	Fatalidades e vítimas de acidentes de trânsito			X	X	X	X		X		X			X	X	X			X	X	11
	Benefícios para economia (geração de empregos, uso de recursos)											X								1	

Enfim, destaca-se o número limitado de estudos que agregam indicadores individuais em um único índice composto devido à dificuldade de medir diretamente a sustentabilidade no transporte, conforme indicado por Reisei *et al.* (2014). De fato, apenas quatro artigos da Tabela 3.3 propuseram um índice de sustentabilidade de transporte (Zito e Salvo, 2011; Awasthi *et al.*, 2011; Haghshenas e Vaziri, 2012; Reisei *et al.*, 2014). No entanto, Zito e Salvo (2011) e Haghshenas e Vaziri (2012) atribuem importância igual para os diferentes indicadores, o que pode não ser o caso. Reisei *et al.* (2014) superaram essa limitação ao adotar a análise dos componentes principais/ análise fatorial (PCA / FA). No entanto, não é possível comparar os pesos dos diferentes indicadores calculados por este método, uma vez que não medem a importância teórica dos indicadores. Awasthi *et al.* (2011) utilizaram o TOPSIS-*fuzzy* para superar essa limitação e agregar incerteza ao processo de tomada de decisão. Entretanto, os índices propostos nestas pesquisas têm foco na perspectiva dos gestores municipais, visando auxiliar no processo de planejamento urbano e de transporte, mas não consideram critérios ou alternativas relacionadas à TUC. Além disso, é importante ressaltar que nenhuma dessas pesquisas focou na análise de alternativas sustentáveis para o TUC sob a perspectiva do operador de transporte, como o escopo desta tese.

Com base na revisão bibliográfica sistemática, não foi possível identificar, na literatura, a proposta de indicadores ou um índice composto que operadores de transporte pudessem adotar para avaliar a sustentabilidade de alternativas para a operação do transporte urbano de carga. Deste modo, com base no resultado da revisão bibliográfica narrativa desenvolvida para identificar indicadores de transporte sustentável, é proposto na seção 3.3 um conjunto de indicadores de sustentabilidade aplicado ao TUC.

3.3 Indicadores de sustentabilidade para o transporte urbano de carga

Campos *et al.* (2009) listam os principais impactos associados ao transporte urbano segundo as três dimensões da sustentabilidade: (i) no aspecto ambiental: poluição do ar, ruído e consumo de recursos naturais; (ii) no aspecto social: saúde, equidade e justiça de oportunidades; (iii) no aspecto econômico: economia, custos de transporte, competitividade e subsídios. Com base nesses impactos e na lista de indicadores de transporte sustentável que podem ser adaptados ao TUC (Tabela 3.3), foram selecionados onze indicadores que podem

ser usados para avaliar alternativas de operações de transporte urbano de carga e classificá-las em termos de sustentabilidade.

- **Indicadores relacionados ao desempenho ambiental do TUC**

Entre os indicadores ambientais de transporte sustentável identificados na revisão bibliográfica narrativa (Tabela 3.3), aqueles que foram adotados com maior frequência pelos estudos analisados são: ‘Emissões de GEE’; ‘Emissões de poluentes atmosféricos locais’; ‘Poluição sonora’; ‘Consumo de energia de origem fóssil’; e ‘Consumo de energia alternativa e/ou renovável’.

Conforme previamente destacado, Campos *et al.* (2009) apontam que os principais impactos ambientais relacionados ao transporte urbano são: poluição do ar, ruído e consumo de recursos naturais. Assim, verifica-se que, entre os indicadores listados na Tabela 3.3, aquele que pode ser aplicado para mensurar o impacto de uma ação com relação à poluição do ar é ‘Emissões de poluentes atmosféricos locais’. De fato, o TUC é responsável por 40% da poluição atmosférica nas cidades europeias (LINDHOME, 2010). No caso dos transportes, os poluentes atmosféricos que atuam localmente e, portanto, têm maior impacto nas áreas urbanas, são CO, NO_x e MP. Veículos movidos a diesel contribuem predominantemente para a emissão de NO_x e MP, enquanto automóveis e motocicletas, no Brasil movidos a gasolina ou etanol, são os principais responsáveis pela emissão de CO (D'AGOSTO & RIBEIRO, 2009). Portanto, propõe-se o indicador ‘Emissão de poluentes atmosféricos (CO, NO_x e MP)’ para medir o impacto relativo à poluição atmosférica.

O TUC também é responsável por uma parte significativa da poluição sonora nas cidades, causando desconforto às pessoas (D'AGOSTO, 2015). Assim, para medir este impacto ambiental, optou-se por adaptar o indicador ‘Poluição sonora’, identificado previamente na literatura (Tabela 3.3), para ‘Nível de ruído do sistema de transporte’.

Além disto, o setor de transporte foi o segundo maior emissor de CO₂, em 2008 (D'AGOSTO, 2015). Isto se deve à sua quase total dependência do uso de combustíveis derivados de petróleo, tendo em vista que a produção de CO₂ está relacionada à queima de combustíveis fósseis. Em particular, o transporte foi responsável, em 2010, por 15% das emissões de GEE no mundo, sendo que 40% deste total devido ao transporte de carga, incluindo o transporte

internacional (CALCULADORA GLOBAL, 2018; SIMS *et al.*, 2014). No Brasil, o setor de transporte foi responsável, em 2010, por 13,8% do total de emissões de GEE, sendo que 53% deste total é devido ao transporte doméstico de carga (D'AGOSTO *et al.*, 2018). No entanto, segundo o IPCC (2014), a atividade de transporte contribuiu com menos de 3% do total de emissão de outros GEE, que não o CO₂, em 2010. Além disto, o TUC, devido a viagens curtas de baixa velocidade e às frequentes paradas, necessárias para a distribuição urbana, apresenta altas taxas de emissão de CO₂. Neste contexto, optou-se por adaptar o indicador 'Emissões de GEE', identificado na revisão bibliográfica narrativa (Tabela 3.3), para 'Emissão de CO₂'.

Ainda, como existe uma alta correlação entre o consumo de energia fóssil e as emissões de CO₂, optou-se por não incluir o indicador 'Consumo de energia de origem fóssil', identificado na revisão bibliográfica narrativa, no conjunto de indicadores propostos para avaliar a sustentabilidade de operações de transporte urbano de carga. Entretanto, optou-se por considerar o consumo de energia, tanto de origem fóssil quanto energia alternativa e/ou renovável, por meio do indicador 'Intensidade energética'. Este indicador está diretamente relacionado ao consumo de energia e à eficiência energética da operação. Acompanhando o indicador de 'Emissão de CO₂' e o de 'Intensidade Energética' simultaneamente, ainda é possível verificar, por meio da razão entre estes, a intensidade de carbono da operação.

Enfim, como a presença de veículos de carga contribui para o congestionamento do tráfego em áreas urbanas, optou-se por incluir o indicador 'produtos transportados por m²', que indica a razão entre o volume (ou massa) de carga transportada e a área projetada que o veículo ocupa na via, representando assim o impacto da operação no espaço público. Um sistema, que pode transportar um maior volume (ou massa) em menos espaço, ocupa menos espaço público e, portanto, tende a ter um menor impacto. No entanto, no TUC, a carga tende a ser mais volumosa do que pesada, de modo que a capacidade de carga em volume é geralmente usada como indicador de desempenho, em vez da capacidade de carga em peso (toneladas) (SHOEMAKER *et al.*, 2006). Logo, este indicador apresenta uma relação do volume transportado (m³) pela área projetada que o veículo ocupa na via (m²).

- **Indicadores relacionados ao desempenho econômico do TUC**

Entre os indicadores econômicos de transporte sustentável identificados na revisão bibliográfica narrativa (Tabela 3.3), aqueles que foram adotados com maior frequência pelos estudos analisados são: ‘Custo total de transporte’ e ‘Tempo gasto em congestionamento’. Shiau e Liu (2013) também consideraram o indicador ‘Taxa de Ocupação’ e Awasthi *et al.* (2011) adotaram o indicador ‘Produtividade’.

Conforme previamente destacado, Campos *et al.* (2009) apontam que os principais impactos econômicos relacionados ao transporte urbano são: economia, custos de transporte, competitividade e subsídios. De fato, o TUC é responsável por uma alta proporção dos custos totais de transporte (28%) (SHOEMAKER *et al.*, 2006). Deste modo, destaca-se a importância de se considerar o ‘custo total de transporte’ como indicador relacionado ao desempenho econômico do TUC.

A produtividade da operação TUC está relacionada com a taxa de ocupação do veículo e também com a velocidade operacional média. Desta forma, optou-se por adotar o indicador ‘taxa de ocupação’ como um indicador econômico, uma vez que este reflete a eficiência das operações de transporte e, portanto, está associado à sua competitividade. Neste contexto, a ‘velocidade operacional média’ também é considerada um indicador econômico, pois pode influenciar a produtividade do operador de transporte. Além de gerar grande perturbação à população local, o nível de congestionamento de tráfego, no qual o TUC desempenha um papel importante, leva a redução da ‘velocidade média operacional’, podendo influenciar negativamente a produtividade e desempenho econômico da operação. Destaca-se que o indicador ‘Tempo gasto em congestionamento’, identificado na revisão da literatura (Tabela 3.3), não foi considerado, por estar relacionado à velocidade média da operação.

- **Indicadores relacionados ao desempenho social do TUC**

Entre os indicadores sociais de transporte sustentável identificados na revisão bibliográfica narrativa (Tabela 3.3), aquele adotado com maior frequência pelos estudos analisados é: ‘Fatalidades e vítimas de acidentes de trânsito’. No contexto do transporte urbano de carga, acidentes de trânsito impactam o fluxo de tráfego, devido à dificuldade da remoção do veículo e da carga transportada, levando a um aumento no nível de congestionamento de tráfego.

Assim sendo, o indicador ‘número de fatalidade e feridos em acidentes de trânsito por veículos’ é usado para medir a segurança do sistema e, portanto, está relacionado ao impacto na saúde. Este indicador é calculado por meio da razão entre o número de feridos e/ou mortos em acidentes e o total de veículos da frota nessa operação.

Conforme previamente destacado, Campos *et al.* (2009) apontam que os principais impactos sociais relacionados ao transporte urbano são: saúde, equidade e justiça de oportunidades. Identificou-se, por meio da revisão bibliográfica narrativa, que Awasthi *et al.* (2011) adotam o indicador ‘Benefícios para economia (geração de empregos e uso de recursos’ para avaliar a justiça de oportunidades gerada por operações de transportes. Para inferir a equidade e justiça de oportunidades de operações TUC, optou-se por adotar os indicadores 'renda gerada' e 'imposto gerado' pela operação de transporte urbano de carga analisada. Estes indicadores capturam o total de trabalho e dinheiro gerados pela operação de distribuição e revertidos para a população local, de modo que são adotados para estimar o impacto da operação na vida da população local.

A Tabela 3.4 sumariza os indicadores de sustentabilidade propostos para o TUC, bem como apresenta a unidade de medida proposta para cada um destes indicadores. Estes indicadores foram propostos com base nos indicadores de transporte sustentável apresentados em pesquisas existentes ou foram desenvolvidos de acordo com os critérios identificados na revisão bibliográfica, conforme apresentado nesta seção. Recomenda-se o uso de tais indicadores para a avaliação do nível de sustentabilidade de operações de transporte urbano de carga. Contudo, é importante destacar que ajustes podem ser necessários tanto nos indicadores a serem adotados quanto nas unidades de medida usadas, de acordo com as circunstâncias da operação em análise e segundo a disponibilidade de dados. O fundamental é que as unidades de medidas adotadas sejam coerentes para todos os indicadores a serem analisados, de modo a permitir a comparação entre as diferentes operações TUC.

Tabela 3.4: Indicadores de sustentabilidade para o TUC

Categoria	Indicadores	Unidade
Ambiental	Emissão de poluentes atmosféricos (CO, NO _x , MP ₁₀)	g/t.km
	Emissão de CO ₂	kg/t.km
	Nível de ruído	dBA
	Intensidade energética	MJ/t.km
	Volume transportado por m ²	m ³ /m ²
Econômico	Taxa de ocupação	%
	Custo total de transporte	US\$/t.km
	Velocidade média operacional	km/h
Social	Nº de fatalidade e feridos em acidentes de trânsito por veículo	Feridos/veículo
	Renda gerada	US\$/t.km
	Imposto gerado	US\$/t.km

Enfim, os indicadores apresentados na Tabela 3.4 podem ser agregados em um índice de desempenho social, econômico e ambiental, bem como em um índice composto de sustentabilidade, conforme apresentado no Capítulo 4.

4 PROPOSTA DE ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE PARA TRANSPORTE URBANO DE CARGA

Este capítulo apresenta as etapas para o desenvolvimento de um índice composto para avaliação e seleção de operações de transporte urbano de carga em termos de sustentabilidade. Porém, inicialmente, é importante ressaltar a confusão em relação ao emprego dos termos índice e indicadores, que têm sido adotados, de forma errônea, como sinônimos (SICHE *et al.*, 2007). Na verdade, um índice “é o valor agregado final de todo um procedimento de cálculo, onde se utilizam, inclusive, indicadores como variáveis que o compõem” (SICHE *et al.*, 2007).

A base dos índices é composta por: (i) dados primários, que são a fonte das informações; (ii) dados agregados, que são as informações extraídas; (iii) sub-indicadores, que são as informações tratadas; (iv) indicadores, que trata da compilação dos sub-indicadores; (v) sub-índices, que são indicadores em grupos conforme tema; e (vi) índices, que são uma compilação dos sub-índices. Porém, nem todo processo de definição de índice precisa ter todos estes componentes. O índice proposto nesta tese se baseia em indicadores agrupados em um conjunto de sub-índices, que compõem o índice de sustentabilidade para o TUC.

Assim sendo, o índice proposto mede aspectos multidimensionais da sustentabilidade, que não podem ser completamente abordados apenas por indicadores individuais (REISEI *et al.*, 2014). No entanto, salienta-se que um único índice não pode abordar todas as questões referentes à sustentabilidade (JOLLANDS *et al.*, 2003) e, portanto, são propostos múltiplos índices. O procedimento proposto se baseia no desenvolvimento de índices de desempenho ambiental, social e econômico para o TUC, com base nos indicadores de sustentabilidade propostos no Capítulo 3 (Tabela 3.5). Esses índices são então agregados em um índice composto. Para a quantificação dos indicadores e índices, é proposto um modelo hierárquico-*fuzzy*, considerando diferentes pesos e incertezas.

Foram considerados, nesta tese, conceitos de lógica *fuzzy* e métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão para o desenvolvimento de um modelo de índice composto para análise da sustentabilidade de operações de transporte urbano de carga. Optou-se por utilizar a lógica *fuzzy* devido a sua capacidade de converter o conhecimento humano e sua capacidade de

tomada de decisão em *frameworks* baseados em regras e fórmulas matemáticas, o que é difícil de alcançar por meio de técnicas analíticas convencionais (RAJAK *et al.*, 2016).

Ainda, algumas variáveis de entrada (*inputs*) para análise da sustentabilidade do TUC não podem ser determinadas analiticamente, exigindo o julgamento de especialistas (AWASTI *et al.*, 2011). Assim, a lógica *fuzzy* permitiu incorporar o conhecimento de especialistas em meio ambiente e transportes no processo, considerando a subjetividade e as incertezas envolvidas neste tipo de avaliação. Por meio do conhecimento acumulado por especialistas e das informações presentes na literatura técnica, são estabelecidas regras para inferir as principais relações entre a operação de transporte urbano de carga e seu impacto em termos de sustentabilidade. Logo, as opiniões e experiências acumuladas por especialistas na área de engenharia de transportes e meio ambiente são utilizadas para geração de curvas de pertinência do conjunto fuzzy do problema, possibilitando a associação gradual de valores numéricos a termos linguísticos (FILIPPO, 2008).

Destaca-se também que a lógica *fuzzy* permite o tratamento das incertezas e subjetividades de maneira mais adequada, oferecendo credibilidade nos resultados e na tomada de decisão (FILIPPO, 2008). Portanto, a escolha da lógica *fuzzy* como ferramenta principal a ser utilizada na metodologia proposta também é justificada pela existência de incertezas, imprecisões e subjetividade na solução do problema em questão, que apresenta incertezas e vaguezas, tais como: a incerteza na participação ou peso de cada fator no impacto do TUC; incerteza em valores envolvidos na análise da sustentabilidade; dificuldade na definição de probabilidades de ocorrência dos impactos na operação; e subjetividade na determinação da importância dos impactos de cunho socioeconômico e ambientais da operação do TUC.

Além disto, a inferência *fuzzy* estruturada de maneira hierárquica, tal como proposto nesta tese, permite o decisor analisar o problema de forma integrada e verificar como um determinado fator influencia o processo decisório. Portanto, são adotados conceitos relacionados a métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão para permitir a consideração de pesos distintos para diferentes indicadores de sustentabilidade, abordando assim uma lacuna na literatura previamente apontada por Reisei *et al.* (2014) e Santos e Ribeiro (2013).

A metodologia para avaliação da sustentabilidade de operações de transporte urbano de carga proposta se baseia em um modelo fuzzy-hierárquico, seguindo assim a tendência, apontada por Filippo (2008), no que tange a adoção da lógica *fuzzy*, combinada com outras técnicas, em processos de tomada de decisão que envolvam parâmetros de caráter técnico, econômico e também de caráter ambiental. A metodologia proposta é composta por cinco etapas, descritas a seguir: (i) caracterização da operação de transporte urbano de carga; (ii) definição e tratamento das variáveis de entrada (inputs); (iii) elaboração da arquitetura da rede fuzzy; (iv) processo de inferência e defuzzificação; e (v) avaliação e seleção da melhor alternativa.

4.1 Caracterização da operação de transporte urbano de carga

Antes da avaliação da sustentabilidade da operação de transporte urbano de carga, devem ser caracterizadas as seguintes estruturas utilizadas no processo de distribuição: a área de entorno da operação; veículo, vias e terminais utilizados; o tipo de carga transportada e os processos desenvolvidos para carga, descarga e controle.

É fundamental conhecer as características do entorno da rota a ser seguida no TUC em função dos diferentes tipos de área (comercial, residencial, industrial, centro histórico etc.), da densidade populacional, das características do tráfego local e sua vulnerabilidade ambiental.

As características da via incluem as interseções, as travessias de pedestres, a sinalização e o traçado, a dimensão e o comprimento, enquanto a caracterização dos terminais depende dos produtos transportados, compreendendo a dimensão do espaço, os equipamentos para os processos de carga, descarga e armazenagem; e o tipo de controle dos processos. Por sua vez, a caracterização do veículo depende do modo empregado, da capacidade (volume de carga que pode ser transportada) e do tipo de combustível usado. Enfim, deve ser verificado o tipo de carga a ser transportada e suas características físico-químicas, bem como seus processos de carga e descarga, identificando os métodos de carga/descarga, os equipamentos utilizados, o manuseio da carga e processos de controle de carga e descarga (CRUZ, 2011).

4.2 Definição e tratamento das variáveis de entrada (inputs)

Recomenda-se o uso dos indicadores de sustentabilidade para o TUC, propostos no Capítulo 3 (Tabela 3.5), como variáveis de entrada (*inputs*) no modelo hierárquico-*fuzzy* proposto. No entanto, deve-se analisar, previamente, se os indicadores propostos são de fato representativos para o caso avaliado. Caso contrário, adaptações podem ser necessárias, se as características da operação avaliada e a disponibilidade dos dados assim o exigirem.

As variáveis de entrada selecionadas são definidas de acordo com seu tipo (qualitativo ou quantitativo) e termos linguísticos, conforme apresentado na Tabela 4.1. São sugeridos três termos linguísticos (baixo, médio e alto) para cada variável de entrada.

Tabela 4.1: Variáveis *fuzzy*

Variável de entrada (<i>input</i>)	Tipo	Termo linguístico		
Emissão de poluentes atmosféricos (CO, NO _x , MP ₁₀)	Quantitativo	Baixo	Médio	Alto
Emissão de CO ₂	Quantitativo	Baixo	Médio	Alto
Nível de ruído	Quantitativo	Baixo	Médio	Alto
Intensidade energética	Quantitativo	Baixo	Médio	Alto
Volume transportado por m ²	Quantitativo	Baixo	Médio	Alto
Taxa de ocupação	Quantitativo	Baixo	Médio	Alto
Custo total de transporte	Quantitativo	Baixo	Médio	Alto
Velocidade média operacional	Quantitativo	Baixo	Médio	Alto
Nº de fatalidade e feridos em acidentes de trânsito por veículo	Quantitativo	Baixo	Médio	Alto
Renda gerada	Quantitativo	Baixo	Médio	Alto
Imposto gerado	Quantitativo	Baixo	Médio	Alto

No problema em análise, todas as variáveis são de natureza quantitativa, e os especialistas devem medi-las em campo ou obtê-las por meio de pesquisa, por projeções ou estimativas (CURY, 1999). Assim, os dados para estimativa das variáveis de entrada devem ser levantados com base em entrevistas com os operadores logísticos ou embarcadores analisados, sendo necessária, em alguns casos, a coleta destes dados em campo, por meio do acompanhamento da operação tanto no caso real (*baseline*) como para as demais alternativas. Por exemplo, para se estimar o total de emissão de poluentes atmosféricos e de CO₂ é preciso levantar o total de combustível adotado na operação ou mensurar estas emissões por meio de equipamentos específicos. Por sua vez, para o nível de ruído, é preciso acompanhar a operação realizando medições por meio de um aparelho medidor de decibéis.

Uma vez que as variáveis de entrada são devidamente mensuradas, seus valores *crisp* são então convertidos em variáveis linguísticas, no processo de fuzzificação. Para cada indicador (Tabela 4.1), um conjunto *fuzzy* deve ser determinado a partir de opiniões de especialistas e depois modelado em forma trapezoidal, apresentadas por $[c_1, a_1, b_1, d_1]$, $[c_2, a_2, b_2, d_2]$ e $[c_3, a_3, b_3, d_3]$, como ilustrado na Figura 4.1. De acordo com Shepard (2005), conjuntos *fuzzy* trapezoidais são usados para representar ideias ou expressões difíceis de serem definidas com precisão, sendo bastante empregados em avaliações de sustentabilidade.

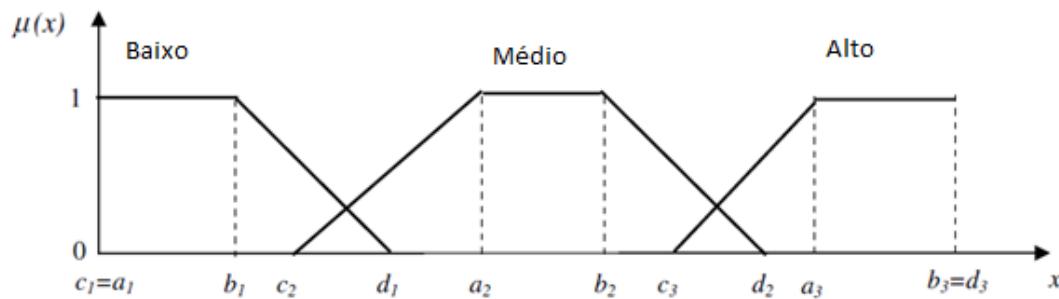


Figura 4-1: Conjunto fuzzy trapezoidal para variável de entrada

Os conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada se baseiam nas respostas dos questionários, computando as frequências das respostas para cada intervalo e para cada variável linguística. A definição destes conjuntos é uma etapa crítica na construção de um sistema *fuzzy*, pois determina a correspondência entre as variáveis de entrada e os seus conceitos linguísticos correspondentes. Porém, foi experimentalmente comprovado que sistemas *fuzzy* têm um bom desempenho, mesmo quando as formas de seus conjuntos não se encontram precisamente desenhados (SOUZA, 2001; CRUZ, 2011).

4.3 Elaboração da Arquitetura da rede fuzzy

A arquitetura da rede *fuzzy* proposta é composta por blocos de inferência, que são estruturas semelhantes aos neurônios de uma rede neural, capazes de receber entradas, processá-las e produzir saídas (VON ALTROCK, 1995).

Com base na recomendação de Von Altrock e Krause (1994) e Cury (1999), foi adotada a prática de não se agregar, em cada nó da rede, mais que três variáveis em um único elemento, por meio de uma base de regras (Bloco de Inferência –BI). Deste modo, a inferência se torna mais fácil de ser executada e, no caso da construção da base de regras, permite a melhor definição dos termos linguísticos de agregação e de composição das regras, bem como da atribuição dos fatores de certeza de cada regra.

A Figura 4.2 apresenta a arquitetura de rede *fuzzy* utilizada para o cálculo do índice composto de sustentabilidade para o TUC, que possui 17 variáveis linguísticas e seis blocos de inferência (BI1 a BI6 na Figura 1). Os blocos de inferência de indicadores de sustentabilidade (na camada mais baixa) são agregados em camadas intermediárias, que fornecem os índices de desempenho social, econômico e ambiental, que variam em uma escala de 0 a 10. Por meio do agrupamento destes índices, é desenvolvido o índice de sustentabilidade para o TUC (ISTUC), em uma escala de 0 (baixo) a 10 (alto nível de sustentabilidade).

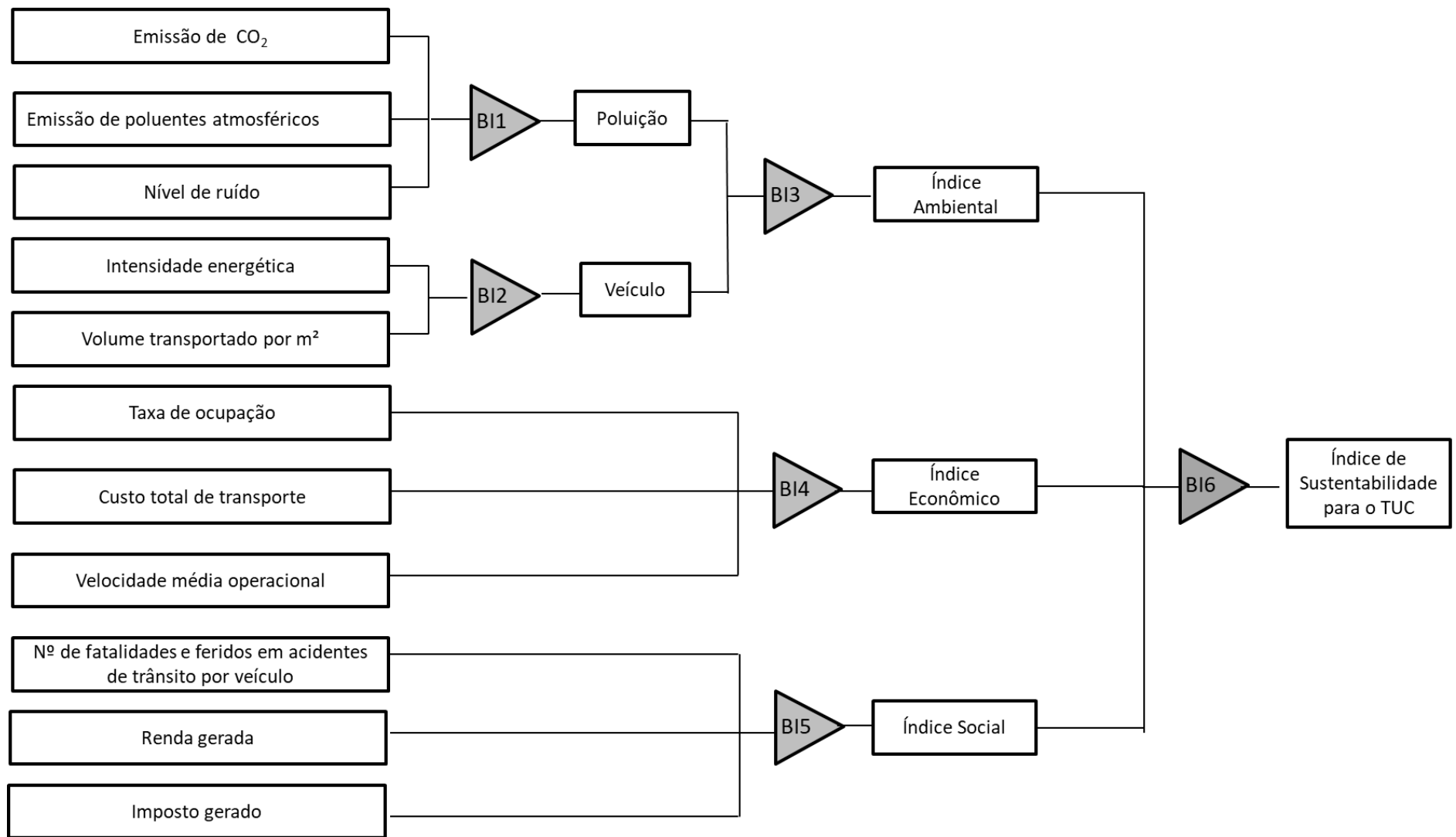


Figura 4-2: Arquitetura da rede *fuzzy*

4.4 Processo de inferência e defuzzificação

A agregação das variáveis de entrada é realizada nos blocos de inferência dos 2º e 3º níveis. A finalidade do processo de inferência é relacionar as variáveis entre si por meio de uma base de regras formada por estruturas do tipo SE –ENTÃO. A base de regras deve ser construída por especialistas, assim como a definição do grau de certeza (GC) de cada regra, que indica o grau de validade da mesma e deve variar entre 0 e 1 (CRUZ, 2011). A Tabela 4.2 apresenta as regras para o nível hierárquico 2 (bloco de inferência BI4) da estrutura do índice de desempenho econômico.

Tabela 4.2: Base de regras para o Indicador de Desempenho Econômico devido aos indicadores de taxa de ocupação, custo total de transporte e velocidade média operacional

Regra	Antecedentes									Consequência					FC		
1	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
2	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
3	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
4	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
5	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
6	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO	1
7	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	BAIXO	1
8	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
9	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
10	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO	1
11	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
12	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
13	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
14	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO	1
15	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
16	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
17	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
18	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO	1
19	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
20	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
21	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	ALTO	1
22	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO	1
23	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
24	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
25	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
26	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO	1
27	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1

Nesta tese, adota-se para inferência *fuzzy* o método de Mamdani, que é bastante utilizado em problemas de engenharia, podendo produzir boas respostas a partir da criação de uma base de regras gerada por observações e pelo conhecimento dos especialistas sobre o problema (FILLIPO, 2008). O método de inferência de Mamdani combina os graus de certeza de cada um dos termos linguísticos por meio do operador mínimo e agrega as regras pelo operador máximo, tendo como resultado o vetor linguístico. Deste modo, para cada bloco de inferência apresentado na Figura 4.2, as variáveis de entrada são adicionadas para obter uma variável *fuzzy*, por meio do processo de inferência Min-Max (Método de Inferência Mamdani) (Eq. 1 e 2). Adota-se a notação proposta por Ross (2004):

$$\mu_{jk}^i = \max_l^k \left| \min[\mu_{A1^l}(x_1), \mu_{A2^l}(x_2), \mu_{A3^l}(x_3)] \right| \text{ para blocos de inferência com três inputs (1)}$$

$$\mu_{jk}^i = \max_l^k \left| \min[\mu_{A1^l}(x_1), \mu_{A2^l}(x_2)] \right| \text{ para blocos de inferência com dois inputs (2)}$$

Onde: A1, A2, A3: conjuntos *fuzzy* correspondente das variáveis de entrada;

l: *l*-ésima regra do sistema de inferência (*l*=1, 2, . . . *r*);

r: número total de regras,

i: índice do indicador de desempenho (ambiental, econômico e social: 1-3);

j: índice das variáveis intermediárias (1-2);

k: índice correspondente ao termo linguístico dos conjuntos *fuzzy* de saída, consequência das regras, variando de *k* = 1 (MUITO BAIXO) a *k* = 5 (MUITO ALTO); e

μ_{jk}^i = valor de pertinência do termo linguístico *k* para cada variável intermediária *j* para o indicador *i*.

Para cada índice de desempenho *i*, calcula-se uma matriz M_{mxn}^i (Eq. 3), cujos elementos μ_{jk}^i representam os valores de pertinência do termo linguístico *k* para cada variável intermediária *j*.

$$M_{mx5}^i = \begin{bmatrix} \text{Baixo} & \text{M/B} & \text{M} & \text{M/A} & \text{Alto} \\ \left(\begin{array}{ccccc} \mu_{11}^i & \mu_{12}^i & \mu_{13}^i & \mu_{14}^i & \mu_{15}^i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mu_{m1}^i & \mu_{m2}^i & \mu_{m3}^i & \mu_{m4}^i & \mu_{m5}^i \end{array} \right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde: m: número de variáveis intermediárias do indicador i; e
n: número de termos linguísticos utilizados para as saídas (n = 5);

Diferentes pesos (π_{ij}) podem ser atribuídos para cada variável intermediária de cada índice de desempenho conforme a opinião de especialistas ou tomadores de decisão. Para tanto, sugere-se seguir o Método de Análise Hierárquica (MAH), proposto por Saaty (1980). A ponderação de Saaty (1980) permite a comparação par a par das variáveis intermediárias, utilizando os termos linguísticos com seus respectivos pesos: Mesma importância (1); Um pouco mais importante (3); Mais importante (5); Muito mais importante (9). Ao final, é obtida uma matriz de comparação paritária cujo cálculo do seu autovetor corresponde aos pesos finais dos indicadores avaliados. Porém, como os pesos variam de 0 a 1, estes devem ser multiplicados por 10 (dez) para transformá-las na escala de 0 a 10. No entanto, ressalta-se que o método de ponderação sugerido, comparando-se para a par os indicadores, pode ser substituído por outro, como a Atribuição Direta dos Pesos ou Pontuação Direta (*Direct Rating*), onde pesos maiores ou menores são atribuídos pelos especialistas de acordo com a importância de cada critério, e, posteriormente, são normalizados (GOMES e GOMES, 2012).

Após a atribuição dos pesos às variáveis intermediárias, pelo MAH ou pelo método de Atribuição Direta dos Pesos, é obtido o vetor π_{1xm}^i (Eq. 4). A estes pesos são aplicados valores de pertinência do termo linguístico k, obtendo-se um vetor linha A_{1x5}^i (Eq.5) para cada indicador i. Os valores de pertinência α_{ik} dos termos linguísticos para cada indicador i são então agregados na Matriz A (Eq. 6).

$$\pi_{1xm}^i = [\pi_{i1} \quad \dots \quad \pi_{im}] \quad (4)$$

$$A_{1x5}^i = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \pi_{ij}} \cdot \pi^i \cdot M^i = [\alpha_{i1} \alpha_{i2} \alpha_{i3} \alpha_{i4} \alpha_{i5}] \quad (5)$$

$$A = \begin{matrix} & \text{Baixo} & \text{M/B} & \text{M} & \text{M/A} & \text{Alto} \\ \begin{matrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} & \alpha_{15} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} & \alpha_{25} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \alpha_{34} & \alpha_{35} \end{matrix} \end{matrix} \quad (6)$$

O índice de desempenho S_i para cada indicador i é obtido então pela defuzzificação³ do vetor linguístico A pelo método dos centros de máximo (Eq. 7) para obter as pontuações para cada índice de desempenho S_i .

$$S_i = \frac{(\alpha_{i1} \cdot 0) + (\alpha_{i2} \cdot 2.5) + (\alpha_{i3} \cdot 5) + (\alpha_{i4} \cdot 7.5) + (\alpha_{i5} \cdot 10)}{\sum_{k=1}^5 \alpha_{ik}} \quad (7)$$

Determina-se então o vetor Ω (Eq. 8), que atribui o peso ω_i de cada indicador i (no caso, social, econômico e ambiental). Para a atribuição de pesos, sugere-se seguir o Método de Análise Hierárquica (MAH) ou o Método de Atribuição Direta de Pesos. Em seguida, o vetor linha $B_{1 \times 5}$ é calculado (Eq. 9 a 11). Cada elemento β_k de $B_{1 \times 5}$ corresponde ao valor de pertinência dos termos linguístico k para o indicador composto.

$$\Omega = [\omega_1 \omega_2 \omega_{13}] \quad (8)$$

$$B = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \omega_i} \cdot \Omega \cdot A \quad (9)$$

³ O processo de defuzzificação consiste em transformar o vetor linguístico em um resultado numérico (*crisp*), podendo ser realizado por diferentes métodos, como o Centro dos Máximos e o Centro da Área. Nesta tese, utiliza-se o método do Centro dos Máximos, que, segundo Cruz (2011) Shaw e Simões (2001), Cury (1999), Von Altrock e Krause (1994), é o mais adotado para transformar um resultado linguístico em um valor numérico. Este método determina o valor mais típico para cada termo e então computa o valor que reflete o melhor compromisso com o resultado da inferência *fuzzy* (SILVA, 2005).

$$B = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 \omega_i} \cdot [\omega_1 \omega_2 \omega_3] \cdot \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} & \alpha_{15} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} & \alpha_{25} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \alpha_{34} & \alpha_{35} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B = \begin{matrix} & \text{Baixo} & \text{M/B} & \text{M} & \text{M/A} & \text{Alto} \\ [\beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \beta_4 & \beta_5] \end{matrix} \quad (11)$$

Finalmente, o índice composto de sustentabilidade para o TUC (ISTUC) é estimado por meio do método dos centros de máximo (Eq. 12), considerando o conjunto *fuzzy* de forma triangular, apresentado na Figura 4.3. Portanto, o processo de defuzzificação proposto resulta em quatro variáveis de saída: os índices de desempenho social, econômico e ambiental e o índice de sustentabilidade para o TUC. Os resultados variam de 0 a 10, de modo a facilitar as comparações e classificações entre diferentes operações de TUC. Pontuações próximas a 10 indicam que a operação é mais sustentável segundo as perspectivas socioeconômicas e ambientais.

$$ISTUC = \frac{(\beta_1 \cdot 0) + (\beta_2 \cdot 2.5) + (\beta_3 \cdot 5) + (\beta_4 \cdot 7.5) + (\beta_5 \cdot 10)}{\sum_{k=1}^5 \beta_k} \quad (12)$$

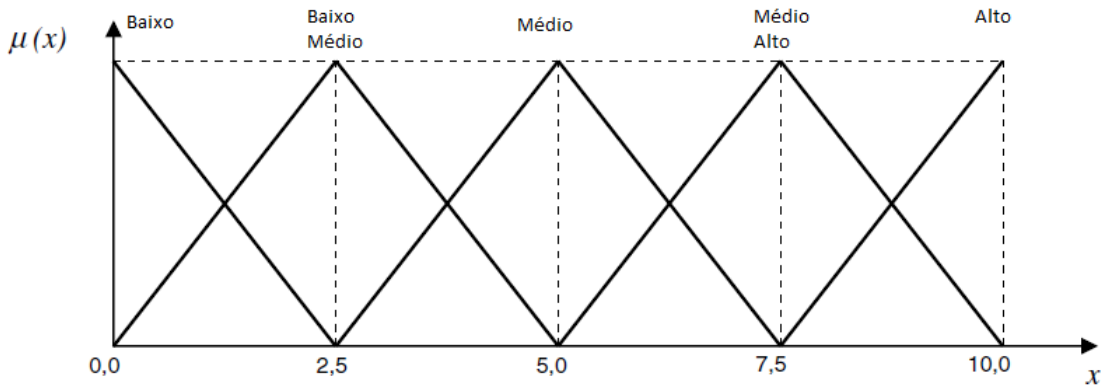


Figura 4-3: Conjunto *fuzzy* triangular para as variáveis de saída

A Figura 4.4 sumariza as variáveis adotadas no modelo hierárquico-fuzzy proposto para estimativa do índice de sustentabilidade para avaliação de operações de transporte urbano de carga.

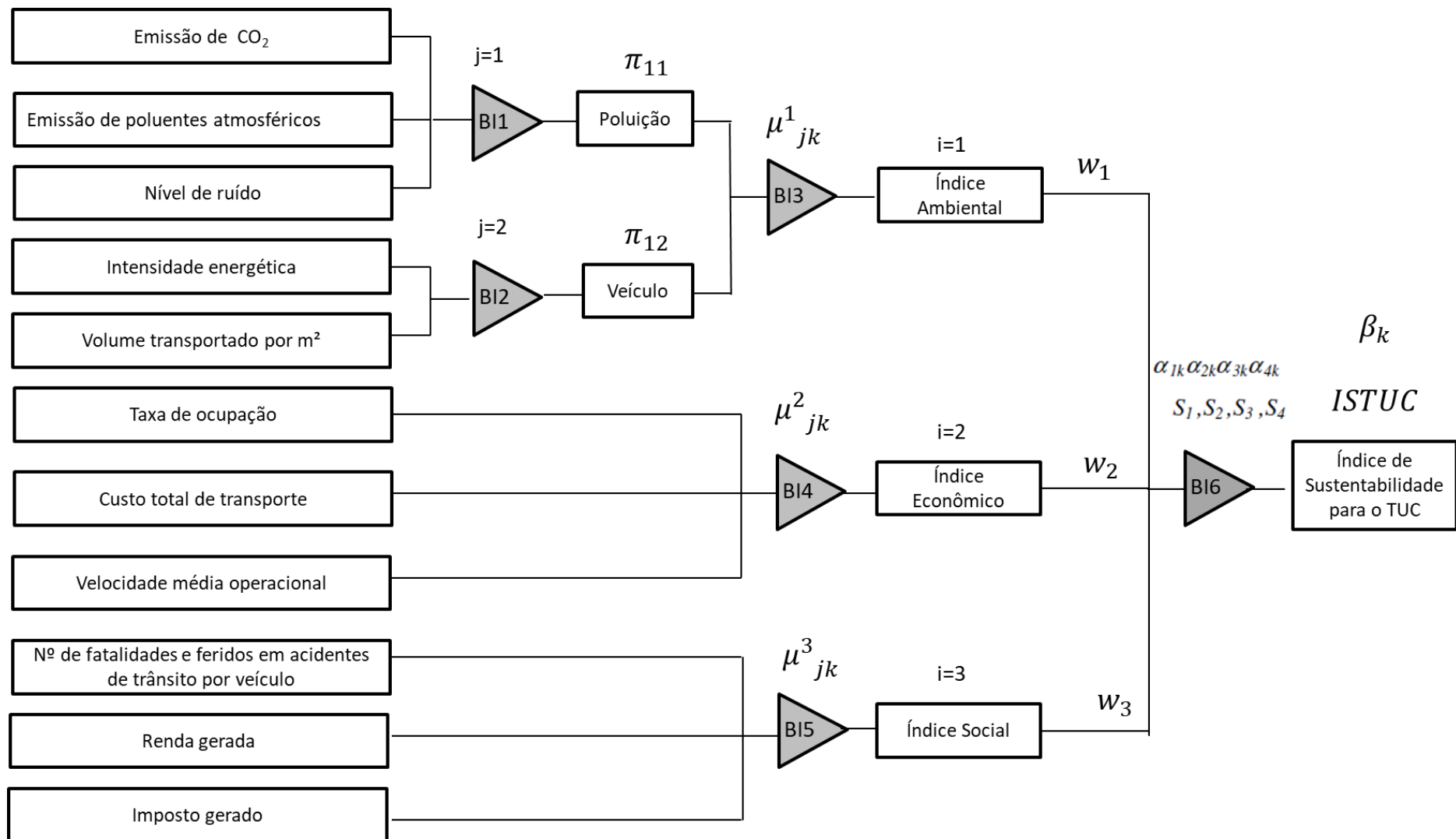


Figura 4-4: Variáveis utilizadas no modelo hierárquico-fuzzy

4.5 Avaliação e seleção da melhor opção

As etapas 1 a 4 fornecem como resultado uma pontuação final para avaliar e classificar alternativas de operação TUC em termos de sustentabilidade. De modo a facilitar a interpretação dos resultados obtidos e a comparação entre as diferentes iniciativas, é proposta na Tabela 4.3 uma escala para interpretação dos índices de desempenho e do índice de sustentabilidade do transporte urbano de carga (ISTUC).

Tabela 4.3: Interpretação da escala dos índices de desempenho e do ISTUC

Índice	Desempenho
$0 \leq \text{Índice} < 2$	Muito Baixo
$2 \leq \text{Índice} < 4$	Baixo
$4 \leq \text{Índice} < 6$	Médio
$6 \leq \text{Índice} < 8$	Alto
$8 \leq \text{Índice} < 10$	Muito Alto

A metodologia fornece como resultado um *ranking* final para o índice composto sustentável (ISTUC), que indica a opção de maior pontuação como sendo a melhor operação em termos de sustentabilidade. Logo, sua implantação seria recomendada. Entretanto, é importante ressaltar que os pesos atribuídos a cada indicador de desempenho (ambiental, econômico e social), ao se calcular o ISTUC, podem alterar o resultado do ranqueamento final das alternativas em termos de sustentabilidade. Deste modo, é fundamental verificar a importância dos pesos atribuídos às variáveis de entrada e às variáveis intermediárias na seleção da melhor alternativa para o TUC. Portanto, recomenda-se o desenvolvimento de uma análise de sensibilidade em situações em que há incerteza quanto à definição da relevância de diferentes critérios.

Para desenvolvimento da análise de sensibilidade, os pesos atribuídos para cada índice de desempenho (S_1 , S_2 e S_3) devem variar individualmente de 1 a 10, sendo observados os efeitos destas variações no valor estimado para o ISTUC. Assim, por meio da análise de sensibilidade, busca-se identificar o quanto o índice de sustentabilidade do transporte urbano de carga é sensível às mudanças nos pesos atribuídos a cada índice de desempenho.

Destaca-se ainda que a metodologia desenvolvida permite a análise comparativa dos indicadores de desempenho ambientais, econômicos e sociais. Assim, uma iniciativa com maior índice de desempenho ambiental, por exemplo, tem menor impacto em relação ao meio ambiente do que as demais. Logo, a aplicação desta metodologia também é capaz de demonstrar os pontos fracos da operação avaliada em termos ambientais, econômicos e sociais.

Enfim, o capítulo 5 apresenta a aplicação da metodologia proposta para a avaliação da sustentabilidade de operações de transporte urbano de carga a um caso em uma megacidade de um país em desenvolvimento.

5 DESENVOLVIMENTO DO ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE PARA O TRANSPORTE URBANO DE CARGA: AVALIANDO AS OPERAÇÕES DE ENTREGA DE CARGA EXPRESSA NO RIO DE JANEIRO

Oliveira *et al.* (2017) desenvolveram uma revisão bibliográfica sistemática com o objetivo de identificar as tendências relativas às formas de operação e tecnologias adotadas para distribuição na última milha do transporte urbano de carga. Os resultados desta pesquisa indicaram uma tendência por alternativas mais sustentáveis para a última milha do TUC, com uma mudança na fonte de energia dos veículos de combustíveis fósseis para energia elétrica e a redução do tamanho dos veículos, especificamente na adoção de bicicletas, triciclos e veículo comercial leve.

Bicicletas elétricas e triciclos são considerados uma alternativa sustentável à mobilidade urbana, devido à sua capacidade de reduzir os distúrbios de tráfego e seu potencial de reduzir as externalidades ambientais do transporte urbano. No entanto, Cherry *et al.* (2009) destacam que, embora bicicletas e triciclos elétricos sejam considerados por alguns como veículos com emissão-zero, há emissões significativas durante a sua fase de descarte, como a emissão de chumbo das baterias. Contudo, poucas pesquisas foram realizadas com o objetivo de quantificar os impactos ambientais deste tipo de veículo. Assim, Cherry *et al.* (2009) se propuseram a quantificar o consumo energético e as emissões de GEE e poluentes ambientais dos processos de produção e da operação de bicicletas elétricas, comparando-os aos impactos ambientais dos modos concorrentes, incluindo ônibus, motocicletas e carros. Os resultados indicaram que a bicicleta elétrica supera outros modos em quase todas as métricas ambientais (CHERRY *et al.*, 2009).

Além disto, é importante ressaltar o impacto positivo do uso de bicicletas e triciclos elétricos com relação a aspectos sociais, tal como a saúde dos usuários. Hinde e Dixon (2005) associaram o aumento da obesidade da população australiana à dependência cultural do uso do automóvel no país. Dutra (2004) afirma que tal dependência também é uma realidade no Brasil. Deste modo, bicicletas e triciclos elétricos contribuem para a saúde da população, tanto por não emitir poluentes atmosféricos, quanto por promover atividade física aos trabalhadores.

Entretanto, apesar dos benefícios apresentados na adoção de bicicletas e triciclos elétricos, pesquisas avaliaram o uso destes veículos principalmente no transporte de passageiros, e não para fins do transporte urbano de carga (MELO E BAPTISTA, 2016). Melo e Baptista (2016) analisaram, por meio de um modelo de simulação de tráfego microscópico, diferentes cenários relacionados à introdução de bicicletas elétricas em substituição a furgões convencionais, de modo a comparar os efeitos de diferentes percentuais de uso na mobilidade na cidade do Porto, Portugal. Os resultados mostram que a substituição de furgões por bicicletas elétricas de carga só deve ser promovida até certo ponto: a substituição de até 10% do transporte de carga por bicicletas elétricas na área de estudo levou a um melhor desempenho de tráfego, em termos de aumento de velocidade e diminuição de atrasos (até 4%). Porém, Melo e Baptista (2016) avaliariam o impacto do uso de bicicletas elétricas na logística urbana apenas sob a perspectiva das autoridades públicas, com o intuito de se atingir o conceito de mobilidade sustentável, sem considerar a perspectiva do setor privado.

Ainda convém destacar que bicicletas ou triciclos elétricos, quando adotados para o TUC, só podem cobrir tipos específicos de negócios, uma vez que não é possível o transporte em paletes. Assim, estes veículos são mais indicados para operações de entrega expressa, entrega de encomendas, sistemas postais, empresas de *courier* privadas e transportadoras de carga fracionada. Como o tamanho e o peso deste tipo de carga são pequenos e a distância de viagem costuma ser curta, essas tecnologias são consideradas soluções viáveis para esse tipo de negócio (Melo e Baptista, 2016).

Nesse contexto, e levando em consideração a carência de estudos que quantifiquem o efeito global de tais tecnologias, optou-se por analisar, por meio da aplicação da metodologia proposta para avaliação da sustentabilidade de operações de TUC, o uso de triciclos elétricos e também de veículo comercial leve elétrico como alternativas para a última milha da distribuição postal, por meio de um estudo de caso de uma empresa pública, que atua neste segmento, na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. Assim, apresenta-se, neste capítulo, a aplicação dos passos propostos no Capítulo 4 desta tese ao caso em análise, sendo adotado o *software* Excel para tabulação e análise dos dados.

5.1 Caracterização da operação de distribuição postal

A distribuição postal consiste de uma série de atividades internas relacionadas a recebimento, triagem, separação, pesagem, ordenamento e lançamento no sistema, que ocupam grande parte do tempo do responsável pela realização do serviço, seguidas da atividade de transporte e entrega em si. Entretanto, esta tese tem como objeto de estudo apenas as atividades que têm início e fim nos momentos de saída e retorno do responsável pela distribuição postal (ou seja, o carteiro) ao Centro de Distribuição (CD). A Distribuição Tradicional Intermodal (DTI) ocorre, atualmente, por meio de caminhada a pé, com a utilização de ônibus convencional e com apoio operacional de um veículo comercial leve com motor a combustão. Deste modo, são propostas duas alternativas de operação: (i) a Distribuição Tradicional Intermodal alternativa (DTIA), que ocorre tal como a operação DTI, porém com a substituição do veículo comercial leve com motor a combustão por um veículo comercial leve elétrico do tipo BEV; e (ii) a Distribuição com apoio de triciclo elétrico. As alternativas de distribuição são detalhadas nas subseções a seguir.

Para avaliar a distribuição com apoio de triciclo elétrico (DTE), a empresa pública de distribuição postal realizou experimentos onde as entregas nos bairros do Leme e Copacabana, na cidade do Rio de Janeiro, Brasil, foram realizadas por triciclos elétricos durante o período de duas semanas. Esses bairros apresentam uma área pequena (4,1 km²) com alta densidade populacional (36.000 hab / km²) e estão localizados em uma área plana, espremida entre uma montanha, uma lagoa e da praia. Esses fatores proporcionam um cenário de alta complexidade para a distribuição urbana, justificando assim a escolha do local para a realização do teste experimental.

5.1.1 Distribuição Tradicional Intermodal (DTI)

Ao sair do CD, o carteiro se desloca ao bolsão de atendimento, onde realiza as entregas. Caso o bolsão seja próximo ao CD, o carteiro percorre a rota estabelecida de ida a pé. Caso contrário, ele recorre ao ônibus urbano convencional de linha para se deslocar até o bolsão de atendimento, onde as entregas são feitas a pé pelo carteiro, com apoio de carrinho de mão e bolsa própria. Devido ao limite legal, o peso da bolsa, estabelecido pelo acordo coletivo da categoria, é de 10 kg para homens e 8 kg para mulheres. Contudo, os carteiros entregam, em

média 40kg por dia. Assim, um veículo comercial leve com motor à combustão realiza o transporte do excedente de peso a pontos pré-definidos de sua rota, que são os pontos de apoio para distribuição (PAD). Portanto, ao terminar a entrega de um carregamento (10 kg), o carteiro se dirige ao PAD para receber mais um carregamento e, a partir daí, tem início uma nova distribuição, que realiza a pé. Ao término da sua rota, o carteiro retorna ao CD por meio do ônibus urbano convencional de linha, tal como ilustrado na Figura 5.1. Enfim, esta operação é realizada por meio de caminhada com apoio de carrinho de mão e bolsa própria, mais a utilização do ônibus convencional e o apoio operacional de um veículo comercial leve com motor à combustão.

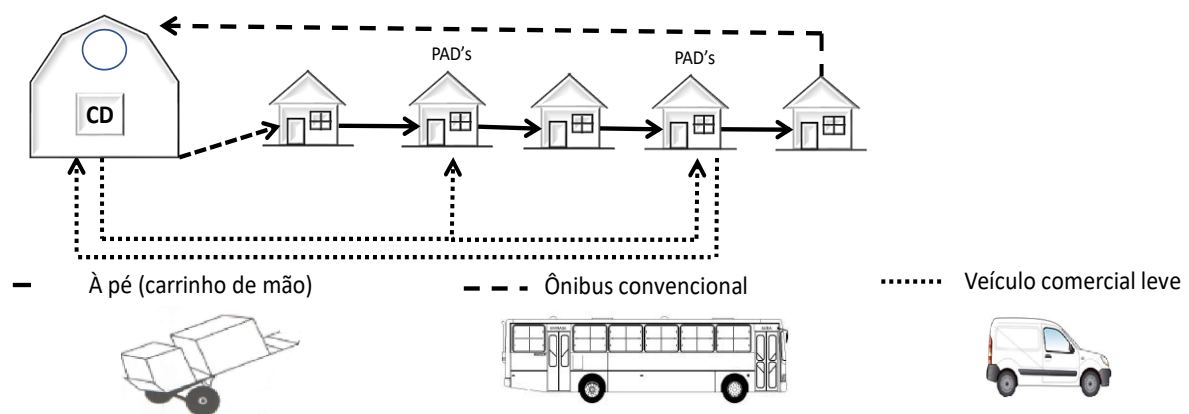


Figura 5.1: Distribuição Tradicional Intermodal

5.1.2 Distribuição Tradicional Intermodal alternativa (DTIA)

Esta operação, assim como a DTI, é realizada por meio de caminhada com apoio de carrinho de mão e bolsa própria e a utilização do ônibus convencional. Porém, um veículo comercial leve elétrico do tipo BEV (veículo elétrico a bateria) realiza o transporte do excedente de peso até os PAD's. Esta alternativa tem como objetivo analisar os impactos socioeconômicos e ambientais que a substituição do veículo comercial leve com motor a combustão por um veículo comercial leve elétrico do tipo BEV traria para a operação. Portanto, a análise desta operação permite a avaliação da 'utilização de fontes de energia mais limpas', sendo esta uma das iniciativas sustentáveis para o TUC apresentadas no Capítulo 2 desta tese.

5.1.3 Distribuição com apoio de Triciclo Elétrico (DTE)

Esta operação é realizada com o apoio do triciclo elétrico ao longo de todo o percurso, ou seja, desde a saída até o retorno do CD. Assim, o limite de peso passa a ser a capacidade do triciclo (no caso em questão, a capacidade do triciclo utilizado é de 50 kg) e não mais a restrição legal, imposta pelo acordo coletivo da categoria devido ao limite de peso a ser carregado a pé pelo carteiro. Portanto, esta operação dispensa o apoio do veículo comercial leve e da utilização dos PAD's.

O carteiro realiza o deslocamento principal de ida, do CD até o primeiro ponto de atendimento, sobre o triciclo elétrico, pedalando simultaneamente com a assistência do motor ou apenas com o uso do motor. Ao chegar ao bolsão de entrega, estaciona o veículo e realiza as entregas nas proximidades a pé, tal como apresentado na Figura 5.2, e depois retorna ao CD sobre o triciclo elétrico. Assim, ao se adotar os triciclos elétricos, realiza-se a “transferência de transporte de carga para modos mais limpos”, sendo utilizados ainda “diferentes tipos de veículos para a realização de entregas” com “fontes de energia mais limpas.” Portanto, a análise desta operação permite a avaliação de três iniciativas sustentáveis para o TUC, apresentadas no capítulo 2 desta tese. São elas: realização de transferência de transporte de carga para modos mais limpos, utilização de diferentes tipos de veículos para a realização de entregas e coletas; e utilização de fontes de energia mais limpas.

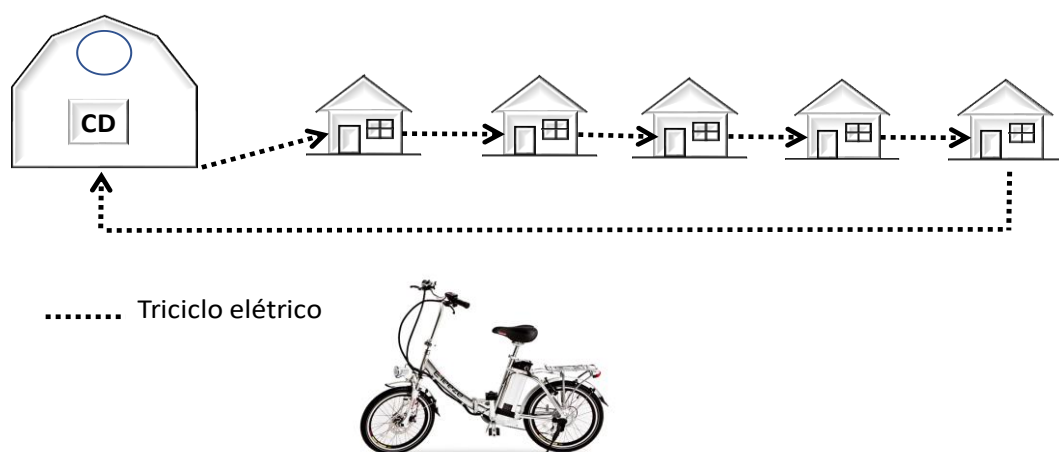


Figura 5.2: Distribuição com apoio de Triciclo Elétrico

As especificações para cada operação analisada são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Especificações para cada operação

Especificações da operação	Und	DTI	DTIA	DTE
Quantidade de dias mês considerados	und	26	26	26
Quilometragem média percorrida na rota	km	5.01por veículo comercial leve 5.44 por ônibus	5.01por veículo comercial leve 5.44 por ônibus	10,74
nº de viagens por dia	und	2	2	1
nº de carteiros atendidos na rota	und	10	10	1

5.2 Definição e tratamento das variáveis de entrada

Esta seção apresenta o processo de coleta de dados, bem como a definição e tratamento das variáveis de entrada.

5.2.1 Coleta de dados

A coleta de dados foi realizada, para as operações DTI e DTE, de terça a quinta, durante dois meses. Durante este período, o mesmo carteiro foi monitorado durante dez dias de operação, sendo cinco para cada tipo de operação. Em média, o carteiro realizava entregas em 60 pontos diferentes por dia de trabalho.

Os dados coletados podem ser agrupados em cinco categorias: (i) tempo – ida, volta e entrega; (ii) distância – ida, volta e entrega; (iii) velocidade média – ida, volta e entrega; e (iv) número de clientes atendidos. Além disso, também foi coletado o consumo médio de combustível e seu respectivo custo para ambos os processos de entrega.

Com relação à operação DTIA, foram considerados os dados coletados na operação DTI, sendo alteradas apenas as características técnicas do veículo comercial leve com motor à combustão para o veículo comercial leve elétrico do tipo BEV, uma vez que esta é a única diferença entre estes dois tipos de operação.

Os dados coletados foram tabulados e a normalidade da amostra foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk, sendo o p-valor encontrado superior a 0,05 (nível de significância adotado) para todos os dados analisados (BUSSAB e MORETTIN, 1987), como apresentado na Tabela 5.2. Deste modo, pode-se afirmar que a amostra segue uma distribuição normal. Assim, a seguir são apresentados os métodos de avaliação adotados neste estudo.

Tabela 5.2: Resultados do teste de Shapiro-Wilk		
	P-valor	
	DTI	DTE
Tempo total	0.429	0.5028
Distância total	0.546	0.2105
Velocidade média	0.0902	0.4537

5.2.2 Variáveis de entrada

Inicialmente, foram considerados como variáveis de entrada no modelo hierárquico-*fuzzy* os onze indicadores de sustentabilidade para o TUC, propostos na Tabela 4.4. Entretanto, adaptações foram necessárias de acordo com as características da operação avaliada e devido à disponibilidade de dados. Por exemplo, o indicador "Emissão de poluentes atmosféricos" foi inicialmente medido por momento de transporte (em g/t.km). Porém, seria necessário fornecer um valor de referência para este indicador (g/t.km) na cidade do Rio de Janeiro para que os especialistas pudessem associar valores numéricos aos termos linguísticos nos conjuntos *fuzzy*. Contudo, não há pesquisa ou dados disponíveis sobre o valor médio para a carga média (em toneladas ou m³) transportada por rota em operações de transporte urbano de carga na cidade. Deste modo, foi necessário adaptar a unidade de medida originalmente proposta para o indicador 'Emissão de poluentes atmosféricos' de g/t.km em g/km. Pelo mesmo motivo, adaptações semelhantes foram necessárias para os indicadores: 'Emissão de CO₂', 'Custo total de transporte' e 'Renda gerada', sendo todos analisados por distância transportada em vez da razão ser por momento de transporte. Tais alterações foram necessárias devido à falta de dados e estatísticas sobre o transporte urbano de carga no Rio de Janeiro, porém estas foram realizadas de forma coerente para todos os indicadores analisados, de modo que seguem permitindo a comparação entre as diferentes operações TUC.

A seguir, apresenta-se o método de cálculo de cada variável de entrada para os três tipos de operação.

- **Emissão de poluentes atmosféricos e de CO₂**

Considerando apenas o uso final, a DTE não emite gases poluentes e dispensa a utilização do veículo comercial leve e do ônibus urbano. Logo, a avaliação ambiental se baseia na comparação de quanto se deixa de emitir de cada poluente analisado nas operações DTI e DTIA em relação à DTE. Os poluentes analisados foram o CO (monóxido de carbono), NO_x (óxido de nitrogênio), RCHO (aldeídos), NMHC (hidrocarbonetos com a exceção de metano) e MP (material particulado). Também foi analisada a emissão de gases de efeito estufa: CH₄ (Metano), N₂O (óxido nitroso) e CO₂ (dióxido de carbono).

Para o cálculo das emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE) e dos poluentes atmosféricos (PA), foi adotado o método *bottom-up*, de modo que os fatores de emissão de cada gás, obtidos em MMA (2013), foram multiplicados pela quilometragem média percorrida, conforme a Equação 13.

$$E = (fef * df) + (feo * do)/(IPKo*do) \quad (13)$$

Em que: E = Emissão de poluentes atmosféricos da DTI

fef = Fator de emissão do furgão para cada poluente (g / km)

feo = Fator de emissão do ônibus para cada poluente (g / km)

do = Distância percorrida pelo carteiro no ônibus (km)

df = Distância percorrida pelo veículo comercial leve (km)

$IPKo$ = Índice de passageiro por quilômetro do ônibus

O cálculo das emissões de dióxido de carbono (CO₂) se baseou na multiplicação do fator de emissão, obtido em MMA (2013), pelo consumo médio de combustível para cada veículo de combustão interna utilizado na operação DTI. Ainda, para estimar o impacto direto dos gases de efeito estufa, foi utilizada a conversão das emissões de CH₄ e N₂O para o equivalente de CO₂ (cálculo do CO₂ equivalente), considerando as taxas de 21 GWP e 310 GWP, respectivamente.

Os fatores de emissão considerados no estudo são do 2º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MMA, 2013), como apresentado na Tabela 5.3. Porém, ainda deve-se considerar que os ônibus são movidos a diesel S10 B10, mistura que contém 10% em volume de biodiesel e 90% em volume de óleo diesel de petróleo (MMA, 2013). Ainda, o veículo comercial leve adotado nesta operação é abastecido com gasolina C, mistura que contém 73% de gasolina automotiva e 27% de etanol anidro.

Tabela 5.3: Fatores de emissão considerados no estudo.

Ano/Modelo	Combustível	CO ⁽¹⁾	NO _x ⁽¹⁾	RCHO ⁽¹⁾	NMHC _{escap} ⁽¹⁾	CH ₄ ⁽¹⁾	MP ⁽¹⁾	N ₂ O ⁽¹⁾	CO ₂ ⁽²⁾
2013	Flex - Gasolina C	0,25	0,0030	0,0017	0,014	0,026	0,0011	0,026	2,0267
P6 e P7									
PROCONVE	Diesel	0,44	2,103	-	0,033	0,06	0,0200	0,03	2,5909
2012									

Nota: (1) g/km; (2) kg/l, destaca-se que os valores apresentados foram obtidos por meio da média ponderada da proporção de combustíveis na mistura.

Fonte: MMA (2013)

Os dados referentes ao transporte público foram obtidos na base de dados do Rio ônibus (2016). O Sindicato das Empresas de Ônibus da Cidade do Rio de Janeiro (Rio Ônibus) disponibiliza em seu *website* dados históricos (1984-2015) das operações do setor, que permitiram o cálculo do IPK (1,67) e o rendimento energético (2,59 km/l). Por sua vez, o rendimento do veículo comercial leve foi estimado a partir dos dados levantados durante a operação, onde se verificou um rendimento médio de 4,56 km/l.

Com base nos dados apresentados, foram estimadas as emissões das operações DTI e DTIA. A Tabela 5.4 apresenta as reduções mensais de poluentes por rota das operações DTI e DTIA em relação à operação DTE. Considerando apenas as emissões de GEE, tem-se uma redução de emissão de 21,64 kg de CO_{2eq} da operação DTE em comparação à DTI, e de 15,73kg de CO_{2eq} da operação DTE em comparação à DTIA.

Tabela 5.4: Emissão mensal de GEE e poluentes atmosféricos nas operações DTI e DTIA

Operação	CO*	NO _x *	RCHO*	NMHCescap*	CH ₄ *	MP*	N ₂ O*	CO ₂ **
DTI	10,11	32,78	0,02	0,70	1,27	0,33	0,81	21,36
DTIA	6,85	32,74	0,00	0,51	0,93	0,31	0,47	15,57

* Emissões calculadas em g

** Emissões calculadas em kg

Ao se comparar a operação DTIA em relação à DTI, observa-se uma redução nas emissões de 3,26 g de CO; 0,04 g de NO_x; 0,34g de N₂O; 0,02 g de RCHO; 0,19 g de NMHC; 0,34 g de CH₄; 0,02 g de MP e 5,79 kg de CO₂, obtidas com a substituição do veículo comercial leve com motor a combustão por um veículo comercial leve elétrico do tipo BEV. Destaca-se uma redução de emissão de 5,9 kg de CO₂-eq.

Enfim, considerando a distância diária percorrida nas rotas DTI e DTIA (10,44km) e o número de dias de operação no mês (26 dias), tem-se que o indicador ‘Emissão de CO₂’ é de 0,078 kg/km para a operação DTI e de 0,057 kg/km para a operação DTIA.

Além disto, MP é o único poluente atmosférico que apresentou um percentual de ocorrência classificado como inadequado ou ruim (superior aos padrões de qualidade do ar) no Rio de Janeiro, segundo o Relatório da Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro – ano base 2014 (INEA, 2015). Portanto, a emissão de MP foi considerada como o indicador comparativo da emissão de poluentes atmosféricos. Logo, em relação à operação DTI, a redução diária da emissão de MP obtida com o DTE por rota é de 0,0127g, dado que são 26 dias de operação no mês. Assim, considerando a distância total percorrida na rota DTI (10,44 km), tem-se que o indicador ‘Emissão de MP’ equivale a 0,0012g/km. Por sua vez, a redução diária da emissão de PM por rota da operação DTIA é de 0,0119g. Logo, o indicador ‘Emissão de MP’ para a operação DTIA equivale a 0,0011g/km.

• Nível de ruído

Os triciclos e veículos comerciais leves elétricos utilizados, respectivamente nas operações DTE e DTIA possuem baixíssima emissão de ruído motor, a ponto de se considerar que não tem impacto na poluição sonora, segundo seus fabricantes (ECOSTART, 2016; NISSAN, 2018).

No entanto, na operação DTI, são utilizados um ônibus e um veículo comercial leve. O limite de ruído para ônibus e veículos comercial leve com peso bruto total entre 2,0 e 3,5 t no Brasil é estabelecido em 80 dBA e 77 dBA, respectivamente (MMA, 2000). Considerando estes valores, o IPK de 1,67 para o transporte urbano do Rio de Janeiro e o fato de que o veículo comercial leve apoia 10 carteiros, estima-se a emissão média de ruído por meio da equação 14. Logo, como no DTI, 5,44 km são percorridos por ônibus (80 dBA) e 5,0 km por LDV (77 dBA), tem-se que a emissão média de ruído por passageiro transportado é de 8,3 dBA (Equação 14). Para a operação DTIA, desconsidera-se a emissão do veículo comercial leve. Logo, a emissão média de ruído por passageiro transportado é de 4,59 dBA.

$$Ne = ((Ne_f * df)/n_p + (Neo * do) / (IPKo * do)) / (df + do) \quad (14)$$

Onde:

Ne = Ruído emitido na operação DTI (dBA)

Ne_f = Ruído emitido por veículo comercial leve (dBA)

Neo = Ruído emitido por ônibus (dBA)

do = Distância percorrida pelo carteiro no ônibus (km)

df = Distância percorrida pelo veículo comercial leve (km)

$IPKo$ = Índice de passageiro por quilômetro do ônibus

n_p = número de carteiros atendidos pelo veículo comercial leve = 10 na DTI

• Intensidade Energética

A operação DTE adota um triciclo elétrico, cujo consumo energético é de 0,01kWh/km, de acordo com dados do fabricante. Nas operações DTI e DTIA, são utilizados ônibus, cujo rendimento energético, segundo o modelo, ano de fabricação e tipo de combustível (óleo diesel), é de 2,3 km/l (MMA, 2013). Porém, a operação DTIA conta com o apoio de um veículo comercial leve elétrico do tipo BEV (veículo elétrico a bateria), cujo rendimento é de 4,13 km/kWh; enquanto a operação DTI conta com o apoio de um veículo comercial leve com motor à combustão, cujo rendimento, segundo os dados coletados na operação, é de 4,56 km/l.

Na operação DTI e DTIA, 5,44 km, ou seja, mais da metade do percurso da rota, são percorridos por ônibus (2,3km/l). Desta forma, a intensidade energética seria calculada em passageiro.kilômetro transportado pelo ônibus (em MJ/p.km), com base no rendimento

energético do veículo e sua taxa de ocupação. Em seguida, sabendo que cada carteiro transporta uma carga de 10kg em seu malote, poderia ser considerado o valor de 0,01 t por carteiro, de modo que o valor de intensidade energética em MJ/p.km seria dividido por 0,01t para ser transformado em tonelada de carga transportada (MJ/t.km). Contudo, a carga transportada por cada carteiro é baixa, de modo que a intensidade energética da operação realizada por ônibus seria penalizada e os valores calculados seriam superiores até ao da intensidade energética de um veículo comercial leve com motor a combustão. Além disto, pode-se argumentar que o ônibus já realizaria aquele trajeto mesmo que o carteiro não o adotasse como modo de transporte em sua rota, de modo que o consumo energético correria independentemente do seu uso pelo carteiro.

Neste contexto, optou-se por não adotar este indicador para avaliação da operação do transporte urbano de carga para o caso analisado, uma vez que parte significativa das rotas de duas operações é realizada por transporte público de passageiros. Entretanto, isto não invalida ou diminui a relevância deste indicador para casos em que o transporte seja realizado exclusivamente por veículos de carga.

- **Volume transportado por m²:** Nas operações DTIA e DTI, a maior parte da rota é realizada em ônibus e grande parte das três operações (inclusive a DTE) é realizada a pé. Portanto, nenhuma das operações ocupa um espaço significativo nas ruas e áreas de estacionamento para realizar suas entregas. Consequentemente, este indicador não foi considerado totalmente representativo nesta análise, de modo optou-se por não considerá-lo.

- **Taxa de Ocupação:** Na operação DTE, cada carteiro entrega em média 40kg por dia em triciclos de 50 kg de capacidade, de modo que a taxa de ocupação do veículo é de 80%. Tanto na DTI quanto na DTIA, o veículo comercial leve entrega em média 40 kg de carga extra para cada carteiro e, em Copacabana e Leme, cada veículo comercial leve, com capacidade média de 800 kg, atende 10 carteiros, de modo que transporta cerca de 400 kg. Portanto, a taxa de ocupação dos veículos comerciais leve para a DTI e DTIA é de 50%.

- **Custo total de transporte:** calculado com base no Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas (NTC, 2014), conforme Equações 17 e 18.

$$Ct_{DTI/DTIA} = (Cc/h * tc) + (Cp * nv) + (Cm/h * tcf) + (Cf/km * df) \quad (17)$$

Em que, Ct_{DTI} = Custo total da DTI ou da DTIA

Cc/h = Custo do carteiro por hora

tc = Tempo total do ciclo

Cp = Custo da passagem de ônibus

n = Número de viagens de ônibus

Cm/h = Custo do motorista do veículo comercial leve por hora

tcf = Tempo de ciclo do veículo comercial leve

Cf/km = Custo do veículo comercial leve por km (sendo o custo do veículo comercial leve elétrico para a DTIA e o custo do veículo comercial com motor a combustão para a DTI)

df = Distância percorrida pelo veículo comercial leve

$$Ct_{DTE} = (Cc/h * tc) + (Ctr/km * dtr) \quad (18)$$

Em que, Ct_{DTE} = Custo total

Cc/h = Custo do Carteiro por hora

tc = Tempo total do ciclo

Ctr/km = Custo do triciclo por km

dtr = Distância percorrida pelo triciclo em km

É importante salientar que, para cálculo dos custos por km para o triciclo elétrico, o veículo comercial leve com motor a combustão e o veículo comercial leve elétrico, foram considerados os custos relativos à depreciação, manutenção, impostos, seguros obrigatórios, combustível e energia elétrica, conforme indicado em NTC (2014). Deste modo, para levantamento dos preços, foi realizada uma pesquisa de mercado com fornecedores dos diferentes materiais e equipamentos.

A Tabela 5.5 apresenta o detalhamento dos itens considerados para composição dos custos totais da rota analisada para cada tipo de distribuição (DTI, DTIA e DTE). Assim, foram

calculados os custos fixos e variáveis para cada operação, conforme apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.5: Detalhamento dos itens considerados para composição dos custos totais por tipo de operação

Especificações da operação	Und	DTI	DTIA	DTE
Quantidade de dias mês considerados	und	26	26	26
		5.01por veículo comercial leve	5.01por veículo comercial leve	
Quilometragem média percorrida na rota	km	5.44 por ônibus	5.44 por ônibus	10,74
nº de viagens por dia	und	2	2	1
nº médio de passagens de ônibus	und	2,40	2,40	-
Valor da passagem de ônibus em R\$	R\$	3,00	3,00	-
nº de carteiros atendidos na rota	und	10	10	1

Tabela 5.6: Especificação dos custos fixos e variáveis por tipo de operação

Custos Fixos Mensais	Und	DTI	DTE	DTIA
Remuneração de capital	R\$	309,80	33,12	750,21
Salário do motorista + encargos	R\$	2.636,10	-	2.636,10
Salário do carteiro + encargos em rota	R\$	590,11	459,51	590,11
Salário de oficina	R\$	425,65	44,34	425,65
Reposição do veículo	R\$	161,63	47,20	867,75
Licenciamento	R\$	120,55	-	106,02
Seguro do casco do veículo	R\$	162,81	-	386,64
Seguro de responsabilidade civil facultativa	R\$	94,92	-	94,92
Total	R\$	4.501,56	584,17	5.857,40
Custos Variáveis	Und	DTI	DTE	DTIA
Peças, acessórios e materiais de manutenção	R\$/km	0,7100	0,1973	1,7586
Combustíveis	R\$/km	0,7348	0,0100	0,1070
Lubrificantes	R\$/km	0,0153	-	0,0005
Reposição de Baterias	R\$/km	-	0,0377	-
Lavagem e lubrificação	R\$/km	0,2857	0,1432	0,2857
Pneus	R\$/km	0,0327	0,0309	0,0327
Total	R\$/km	1,7786	0,4192	2,1846

Verificou-se que o custo total diário das rotas analisadas para as operações de distribuição DTE foi de R\$ 27,63, para a operação DTI foi de R\$ 38,31 e para a operação DTIA de R\$ 41,11. Assim, considerando as distâncias totais percorridas por rota, conclui-se que o custo total de transporte por km em cada operação é de: R\$ 2,57 para a operação DTE; R\$ 3,67 para a operação DTI; e R\$ 3,94 para a DTIA. Considerando a taxa cambial (real para dólar) de R\$ 3,47/US\$ (março de 2018), tem-se que o custo total de transporte por km para cada operação é de US\$1,14 para a DTIA, US\$1,05 para a DTI e US\$0,74 para a DTE.

- **Velocidade operacional média:** Na operação DTI e na DTIA, o carteiro percorre, em média, uma rota de 13.32 km em 2h02min, de modo que sua velocidade operacional média é de 6,5 km/h (Equação 19). Na DTE, a distância média por rota (considerando o percurso em triciclo e caminhando) é de 10,74km, que é percorrida em 1h35min, logo a velocidade média operacional é de 6,8km/h.

$$V = (tdt)/(tct) \quad (19)$$

Onde, V = velocidade operacional média (km/h);

tdt = Distância total por rota (km);

tct = tempo de deslocamento por rota (h).

- **Número de fatalidade e feridos em acidentes de trânsito por veículo:** Embora 21% das mortes em acidentes de trânsito no Rio de Janeiro envolvam bicicletas, triciclos ou motocicletas, não houve nenhum acidente de trânsito durante a fase de teste da DTE. Portanto, este indicador não pôde ser considerado nesta análise.
- **Imposto gerado:** Dado que a mesma carga é entregue nos dois tipos de operação, o mesmo montante de imposto é pago, de modo que este indicador não foi avaliado nesta análise.
- **Renda gerada:** é calculada segundo a Equação 20. Considerando a distância total percorrida em cada rota, 26 dias de operação por mês e a renda mensal gerada (US\$ 220,07 de

salários para carteiros, motoristas e equipe de manutenção com taxas para as operações DTI e DTIA, e US\$ 148,20 para a operação DTE), a renda gerada por km é de US\$ 0,81 para as operações DTI e DTIA, e US\$0,53 para a DTE.

$$In = \frac{tw}{tdt.nd} \quad (20)$$

Onde:

In = renda gerada por km (US\$/km)

tw = salário com taxas para carteiros, motoristas e equipe de manutenção (US\$);

tdt = distância total percorrida por rota (km)

nd = número de dias de operação por mês

Entretanto, devido às dificuldades apresentadas pelos especialistas em atribuir valores para o limite inferior e superior desse indicador no processo de defuzzyficação, optou-se por utilizar a razão entre o valor da renda total gerada por km pela operação avaliada e o valor médio deste indicador na cidade do Rio de Janeiro. Os especialistas se sentiram mais confortáveis em estabelecer limites para o indicador como uma razão.

A renda média gerada por km pelo transporte urbano de carga no Rio de Janeiro foi calculada considerando o salário mínimo de US\$ 410,65 para caminhoneiros (SCVRTTCGP, 2016). Também foi considerado que 0,73% da população economicamente ativa (PEA) atua no transporte rodoviário de carga ou em atividades distribuição (IBGE, 2014). Como a PEA da cidade do Rio de Janeiro é de 3.083.000 habitantes, estima-se que 22.505 funcionários trabalhem em TUC, gerando uma receita mensal de US\$ 9.536.297,88. Considerando que o número total de deslocamentos para o TUC na cidade é de 16.647 viagens/dia (PDTU, 2014) e que esses movimentos ocorreram apenas em dias úteis (26 por mês), uma renda de US\$ 22,03 é gerada por viagem. No entanto, não há levantamento sobre a distância média percorrida por rota para o TUC no Rio de Janeiro. De acordo com Jaller *et al.* (2016), a distância média por rota para o TUC na região metropolitana da Cidade do México (1485 km²) é de 48,1km. Assim, considerando que a área metropolitana do Rio de Janeiro é de 1255km² e que ambas são megacidades de países em desenvolvimento, esse valor foi adotado para o Rio de Janeiro, obtendo-se o valor de US\$ 0,46 para a renda gerada por quilômetro

percorrido em operações TUC. Aplicando 96% dos impostos sobre salários no Brasil, obtém-se uma receita total de US\$ 0,90/km. Portanto, os valores da razão entre o valor da renda total gerada por km pela operação avaliada e o valor médio deste indicador na cidade do Rio de Janeiro para as operações são: 0,90 para a DTI e DTIA, e 0,59 para a DTE.

Enfim, a Tabela 5.7 sintetiza os valores adotados para as variáveis de entrada para as operações DTI, DTIA e DTE. É importante salientar que, embora inicialmente tenham sido considerados os indicadores de sustentabilidade para o TUC, propostos na Seção 4.2, apenas sete destes se aplicam ao cenário analisado.

Tabela 5.7: Valores adotados para as variáveis de entrada

Índice de Desempenho	Indicadores	Unidade	DTI	DTIA	DTE
Ambiental (i=1)	Emissão de poluentes atmosféricos (MP)	g/km	0,0012	0,0011	0
	Nível de ruído	dBA	8,3	4,59	0
	Emissão de CO ₂	kg/km	0,078	0,057	0
Econômico (i=2)	Taxa de ocupação	%	50	50	80
	Custo total de transporte	US\$/t.km	1,05	1,14	0,74
	Velocidade média operacional	km/h	6,5	6,5	6,8
Social (i=3)	Renda gerada	Razão	0,90	0,90	0,59

Os conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada foram obtidos com o auxílio de oito especialistas da área de engenharia de transportes e em meio ambiente, que possuem o título de doutor, bem como entre cinco e 30 anos de experiência na área. Os especialistas responderam ao questionário do Apêndice I (Questionário para Geração dos Conjuntos Fuzzy em Entrevista com Especialistas), sendo solicitado a cada especialista que, na sua avaliação, apresentasse os limites inferiores e superiores dos termos linguísticos de cada variável quantitativa. Como se busca a utilização de conjuntos *fuzzy* trapezoidais, a avaliação das interseções das respostas dos especialistas permite determinar os “patamares” destes conjuntos, que correspondem aos valores que apresentam pertinência ou grau de certeza máxima (igual a 1). Assim, a partir das frequências das respostas para cada intervalo e para cada variável linguística, foi possível determinar o conjunto *fuzzy* para cada variável de entrada. A Tabela 5.8 apresenta os conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada para a aplicação do modelo hierárquico-*fuzzy* no caso analisado.

Tabela 5.8: Conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada

Índice de desempenho	Indicador	Termos linguísticos		
		Baixo [c1, a1, b1, d1]	Médio [c2, a2, b2, d2]	Alto [c3, a3, b3, d3]
1	1	[0,0,0.025,0.032]	[0.025,0.032,0.445,0.715]	[0.445,0.715,1.072,1.072]
	2	[0,0,40,55]	[40,55,65,75]	[65,75,103,103]
	3	[0,0,0.055,0.18]	[0.055,0.18,0.46,0.76]	[0.46,0.76,1.13,1.13]
2	1	[0,0,30,50]	[30,50,60,80]	[60,80,100,100]
	2	[0.05,0.05,0.70,0.90]	[0.70,0.90,1.25,1.29]	[1.25,1.29,3,3]
	3	[4,4,15,30]	[15,30,40,50]	[40,50,80,80]
3	1	[0.1,0.1,0.4,0.9]	[0.4,0.9,1.3,1.75]	[1.3,1.75,3,3]

Assim, por meio dos conjuntos *fuzzy* gerados (Tabela 5.8), é possível converter as variáveis de entrada (Tabela 5.7) em expressões linguísticas, no processo de fuzzyficação. Os vetores linguísticos, obtidos no processo de fuzzyficação, são então utilizados no processo de inferência *fuzzy*. A Tabela 5.9 apresenta os vetores linguísticos para cada variável de entrada.

Tabela 5.9: Vetores linguísticos

Índice de Desempenho	Indicadores	DTI	DTIA	DTE
1	1	[B=100%,M=0,A=0]	[B=100%,M=0,A=0]	[B=100%,M=0,A=0]
	2	[B=100%,M=0,A=0]	[B=100%,M=0,A=0]	[B=100%,M=0,A=0]
	3	[B=83%,M=17%,A=0]	[B=98,5%,M=1,5%,A=0]	[B=100%,M=0,A=0]
2	1	[B=0,M=100%,A=0]	[B=0,M=100%,A=0]	[B=0,M=0,A=100%]
	2	[B=0,M=100%,A=0]	[B=0,M=100%,A=0]	[B=80%,M=20%,A=0]
	3	[B=100%,M=0,A=0]	[B=100%,M=0,A=0]	[B=100%,M=0,A=0]
3	1	[B=0,M=100%,A=0]	[B=0,M=100%,A=0]	[B=62%,M=38%,A=0]

5.3 Rede de Arquitetura *Fuzzy*

A rede de arquitetura *fuzzy* utilizada para obter o índice de sustentabilidade para o ranqueamento das operações DTI, DTIA e DTE é semelhante àquela apresentada na Figura 3.2, com a adaptação necessária devido às modificações no conjunto de indicadores, como apresentado na Tabela 5.7. A rede de arquitetura *fuzzy* adaptada é apresentada na Figura 5.3.

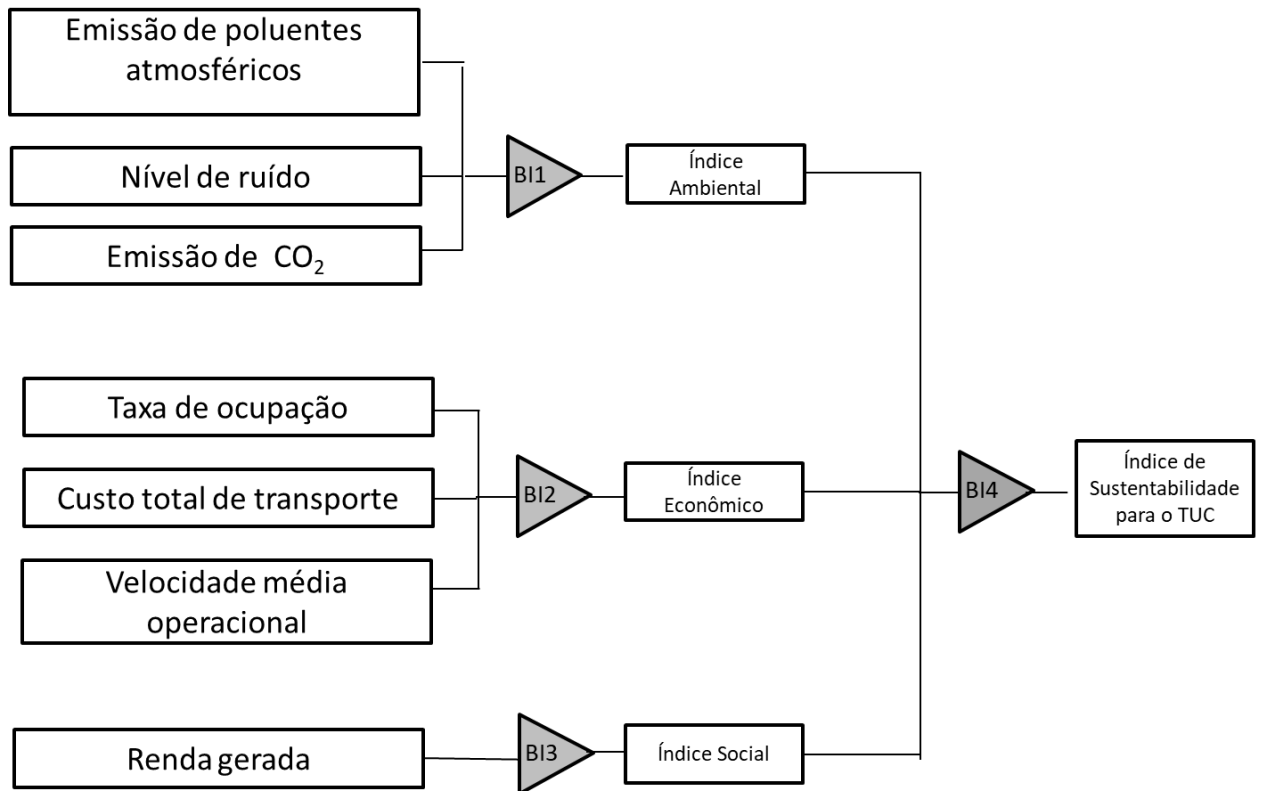


Figura 5.3: Rede de arquitetura *fuzzy*

5.4 Processo de inferência e defuzzificação

Após a elaboração da arquitetura fuzzy (Figura 5.3), o processo de inferência é responsável por agrupar as variáveis, por meio da base de regras formada por estruturas do tipo SE-ENTÃO, para cada bloco de inferência BI.

A Tabela 5.10 apresenta a base de regras para a inferência do bloco 1 (BI-1), constituído pelas variáveis de entrada ‘Emissão de poluentes atmosféricos’, ‘Nível de ruído’ e ‘Emissão de CO₂’, para obter a qualificação do índice intermediário de ‘desempenho ambiental’. Como exemplo das regras apresentadas na Tabela 5.10, conclui-se que: se a emissão de poluentes atmosféricos for baixa, bem como o nível de ruído e a emissão de CO₂, então o índice de desempenho ambiental é alto, com um grau de certeza de 100%.

Tabela 5.10: Base de regras do Indicador de Desempenho Ambiental

Regra	Antecedentes									Consequência				FC			
1	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	ALTO	1
2	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
3	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
4	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
5	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
6	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO	1
7	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
8	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO	1
9	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
10	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
11	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
12	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO	1
13	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
14	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO	1
15	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
16	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO	1
17	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
18	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
19	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
20	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO	1
21	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
22	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO	1
23	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
24	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
25	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
26	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
27	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	BAIXO	1

Em seguida, executa-se a computação da inferência de cada regra, com o método de Mamdani. No caso do BI-1, para o DTE, tem-se para a regra SE:

- Regra 1: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;1\}$
ALTO = 1,0
- Regra 2: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 3: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 4: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;1\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 5: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 6: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 7: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;1\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 8: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 9: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 10: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;1\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 11: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0; 1;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 12: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0; 1;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 13: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0; 0;1\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 14: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO = 0,0

- Regra 15: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 16: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 17: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 18: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 19: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;1\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 20: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 21: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 22: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 23: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 24: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 25: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 26: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 27: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
BAIXO = 0,0

A computação da parte ENTÃO da regra é baseada na Equação 21.

$$GdCIAmb = \text{Max}_n (FC_n \cdot \text{MIN}_i \{GdCPE_i\}) \quad (21)$$

Assim, no caso do BI-1, para o DTE, tem-se que $GdCI_{Amb} = \{BAIXO=0; M\u00c9DIO\ BAIXO=0; M\u00c9DIO=0; M\u00c9DIO\ ALTO=0; ALTO=1\}$. Logo, na opera\u00e7\u00e3o DTE, o \u00edndice de desempenho ambiental \u00e9 alto, com grau de certeza de 100%.

Para as tr\u00eas opera\u00e7\u00f5es analisadas (DTE, DTIA e DTI), este processo \u00e9 realizado para cada um dos blocos de infer\u00eancia, sendo que o resultado do processo da primeira camada \u00e9 o valor de entrada para o processo de infer\u00eancia da camada seguinte e assim at\u00e9 chegar ao processo de infer\u00eancia do \u00faltimo bloco (BI-4). O bloco BI-4 produzir\u00e1 o vetor lingu\u00edstico do ISTUC. No Ap\u00eandice II, s\u00e3o apresentados os resultados da infer\u00eancia de todos os blocos para as tr\u00eas opera\u00e7\u00f5es avaliadas. A Tabela 5.11 apresenta os vetores lingu\u00edsticos dos processos de infer\u00eancia para os \u00edndices de desempenho ambiental, econ\u00f4mico e social para cada opera\u00e7\u00e3o analisada (DTE, DTIA e DTI).

Tabela 5.11: Vetor lingu\u00edstico para os \u00edndices de desempenho ambiental, econ\u00f4mico e social para cada opera\u00e7\u00e3o

\u00cdndice de Desempenho	DTI	DTIA	DTE
Ambiental	[B=0%,MB=0%,M=0%,MA=17%,A=83%]	[B=0%,MB=0%,M=0%,MA=1,5%,A=98,5%]	[B=0%,MB=0%,M=0%,MA=0%,A=100%]
Econ\u00f4mico	[B=0%,MB=100%,M=0%,MA=0%,A=0%]	[B=0%,MB=100%,M=0%,MA=0%,A=0%]	[B=0%,MB=0%,M=20%,MA=80%,A=0%]
Social	[B=0%,MB=0%,M=100%,MA=0%,A=0%]	[B=0%,MB=0%,M=100%,MA=0%,A=0%]	[B=62%,MB=0%,M=38%,MA=0%,A=0%]

Em seguida, os \u00edndices de desempenho ambiental, econ\u00f4mico e social (S_1 , S_2 e S_3 , respectivamente) para cada opera\u00e7\u00e3o alternativa s\u00e3o obtidos pela defuzzifica\u00e7\u00e3o do vetor lingu\u00edstico A, por meio do m\u00e9todo dos centros de m\u00e1ximo.

- **Matriz A**

- DTI

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} L & M & H \end{matrix} \\ \begin{matrix} L \\ M \\ H \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

- DTIA

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} L & M & H \end{matrix} \\ \begin{matrix} L \\ M \\ H \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

- DTE

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} L & M & H \end{matrix} \\ \begin{matrix} L \\ M \\ H \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 \\ 0.62 & 0 & 0.38 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

- **Índice de desempenho S_i**

	DTI	DTIA	DTE
○ Índice ambiental:	$S_1=9.6$	$S_1=9.96$	$S_1=10$
○ Índice econômico:	$S_2=2.5$	$S_2=2.5$	$S_2=7.0$
○ Índice Social:	$S_3=5.0$	$S_3=5.0$	$S_3=1.9$

Finalmente, o índice composto de sustentabilidade para o TUC (ISTUC) é estimado para cada operação alternativa. Nesta aplicação, optou-se por adotar o Método de Atribuição Direta dos Pesos, sendo considerados os mesmos pesos para cada variável intermediária do modelo. Ainda, por meio do método dos centros de máximo, foi adotado o conjunto *fuzzy* de forma triangular apresentado na Figura 4.3 (Capítulo 4), como segue:

- $\Omega = [\omega_1 \omega_2 \omega_{13}] = [1 \ 1 \ 1]$

- **Vetor B**

- DTI

$$B = \begin{matrix} & \begin{matrix} L & M & H \end{matrix} \\ \begin{matrix} L \\ M \\ H \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0,333 & 0,333 \\ 0,333 & 0,057 & 0,277 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

- DTIA

$$B = \begin{matrix} & \begin{matrix} L & M & H \end{matrix} \\ \begin{matrix} L \\ M \\ H \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0,333 & 0,333 \\ 0,333 & 0 & 0,333 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

- DTE

$$B = \begin{matrix} & \begin{matrix} L & M & H \end{matrix} \\ \begin{matrix} L \\ M \\ H \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,21 & 0 & 0,19 \\ 0 & 0,27 & 0,33 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

- Índice de Sustentabilidade para o TUC (ISTUC)
 - DTI: ISTUC=5,7
 - DTIA: ISTUC=5,9
 - DTE: ISTUC=6,3

5.5 Avaliação e seleção da melhor opção

A Figura 5.4 apresenta os resultados para as operações DTI, DTE e DTIA e a Tabela 5.12 propõe uma escala para interpretação dos índices de desempenho e do índice de sustentabilidade do transporte urbano de carga (ISTUC).

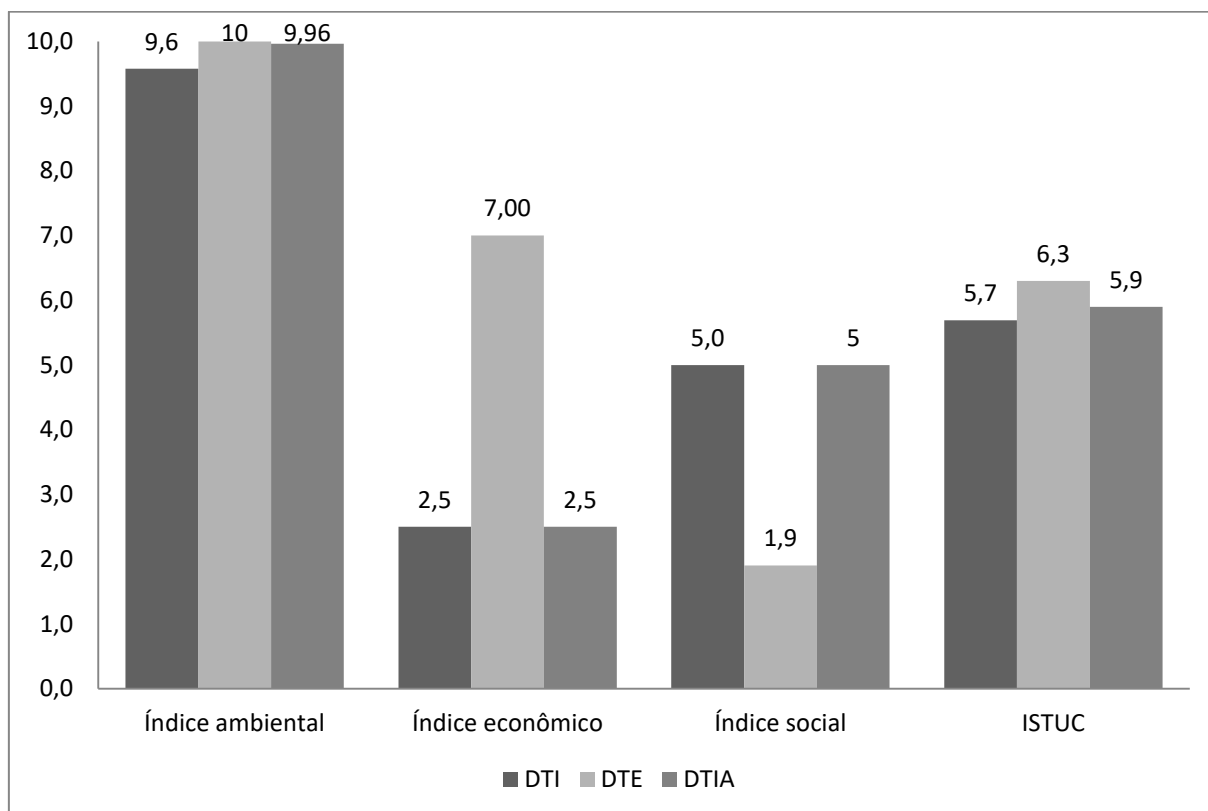


Figura 5-4: Gráfico resumo dos índices para as operações DTI, DTE e DTIA

Tabela 5.12: Interpretação da escala dos índices de desempenho e do ISTUC

Índice	Desempenho
$0 \leq \text{Índice} < 2$	Muito Baixo
$2 \leq \text{Índice} < 4$	Baixo
$4 \leq \text{Índice} < 6$	Médio
$6 \leq \text{Índice} < 8$	Alto
$8 \leq \text{Índice} < 10$	Muito Alto

A Figura 5.4 mostra que a operação DTE apresenta resultados melhores para o índice de sustentabilidade para o TUC (ISTUC) em relação à operação DTI e DTIA. Segundo a interpretação da escala proposta na Tabela 5.12, as operações DTIA e DTI apresentam um nível de sustentabilidade médio, enquanto à operação DTE apresenta um alto nível de sustentabilidade.

Verifica-se, por meio da Figura 5.4, que as três operações apresentam desempenhos ambientais semelhantes, embora a DTE e a DTIA tenham resultados ligeiramente superiores à DTI neste critério. De acordo com a interpretação da escala proposta na Tabela 5.12, as três operações apresentam um desempenho ambiental muito alto.

Conforme observado na Figura 5.4, a operação DTE apresenta melhores resultados em relação ao desempenho econômico, em comparação às operações DTIA e da DTI. Seguindo a interpretação proposta na Tabela 5.12, a operação DTE apresenta um alto desempenho econômico, enquanto a operação DTIA e a operação DTI apresentam baixo desempenho econômico.

Em relação ao desempenho social, observa-se, por meio da Figura 5.4, que as operações DTIA e DTI apresentam um desempenho superior à operação DTE, com S_3 maiores. As operações DTIA e DTI apresentam desempenhos médios em relação a este critério de avaliação, enquanto a operação DTE tem um desempenho social muito baixo.

Entretanto, é importante destacar que, para os resultados apresentados na Figura 5.4, foi considerado que os impactos ambientais, econômicos e sociais têm igual importância. Portanto, adotou-se, por meio do Método de Pontuação Direta (*Direct Rating*), o mesmo peso para cada indicador de desempenho ao se calcular o índice composto sustentável (ISTUC). No entanto, deve ser verificada a importância dos pesos atribuídos às variáveis de entrada e às variáveis intermediárias na seleção da melhor alternativa para o TUC.

Como esta tese tem como objetivo principal oferecer uma metodologia para a avaliação da sustentabilidade de alternativas de TUC aos operadores de transporte, é fundamental considerar a perspectiva destes atores ao determinar os pesos atribuídos aos diferentes índices de desempenho. Em geral, gestores municipais têm como preocupação maior os resultados sociais e ambientais (MIHAIU *et al.*, 2010). Contudo, operadores de transporte tradicionalmente focam nos resultados econômicos, e assim buscam reduzir o impacto de suas atividades por meio de ações que também tragam vantagens econômicas (Browne e Allen, 2011). Deste modo, acredita-se que, na prática, os operadores de transportes poderiam atribuir um peso maior ao desempenho econômico em relação ao social e ambiental. Por esse motivo, realizou-se uma análise de sensibilidade com o objetivo de identificar o quanto o índice de sustentabilidade do transporte urbano de carga é sensível às mudanças nos pesos atribuídos a cada índice de desempenho. Consequentemente, variaram-se os pesos atribuídos para cada índice de desempenho (S_1 , S_2 e S_3) individualmente de 1 a 10, observando-se os efeitos no ISTUC, como ilustrado nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7.

A Figura 5.5 mostra que mudanças no peso do índice de desempenho ambiental, quando analisado individualmente, não invertem as pontuações do ISTU para as três operações analisadas. Com a variação do peso atribuído ao índice de desempenho ambiental de 1 até 10, observa-se que os índices de sustentabilidade (ISTUC) das três operações aumentam: de 5,7 a 8,6 para a operação DTI, de 6,3 a 9,1 para a operação DTE e de 5,9 a 9,0 para a operação DTIA. Assim, o nível de sustentabilidade da operação DTI e DTIA varia de médio a muito alto, de acordo com o peso dado pelo tomador de decisão ao critério ambiental, enquanto o nível de sustentabilidade da operação DTE varia de alto a muito alto.

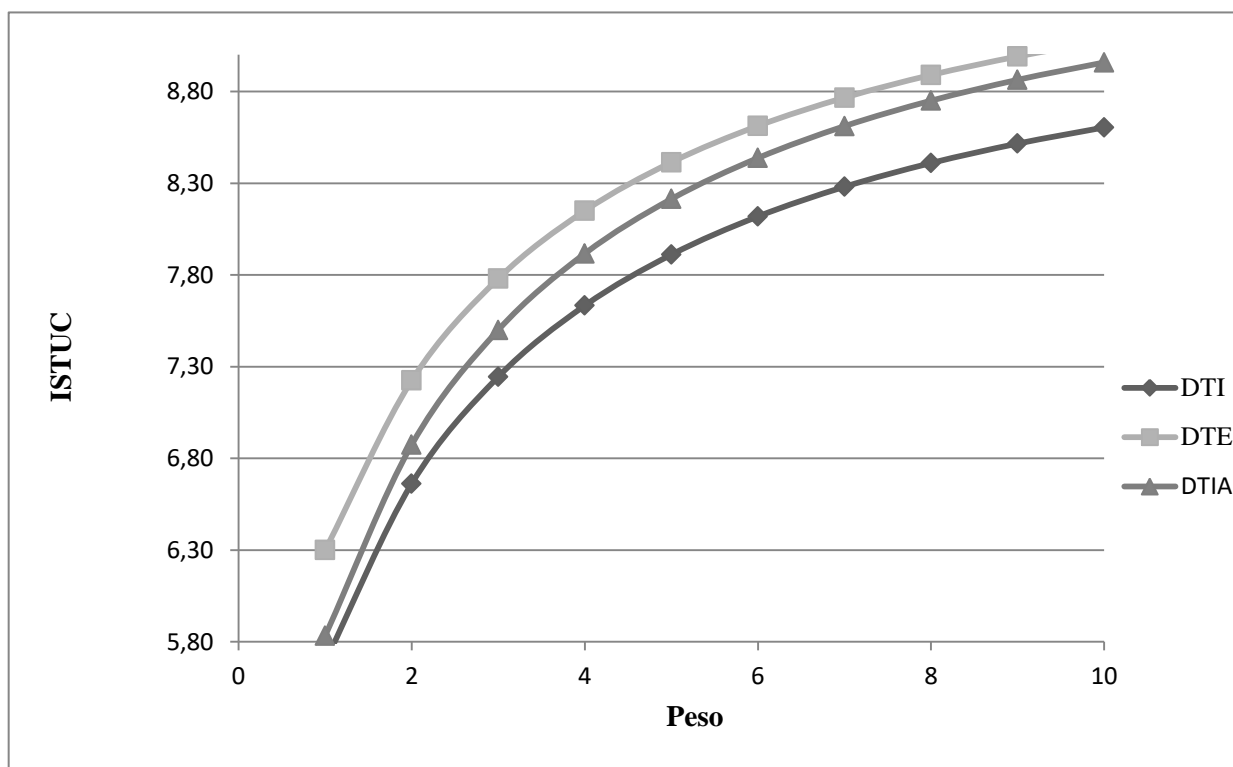


Figura 5-5: Análise de sensibilidade para o ISTUC, variando o peso do índice de desempenho ambiental

A Figura 5.6 apresenta as variações no ISTUC geradas por mudanças no peso do índice de desempenho econômico. Por meio da Figura 5.6, verifica-se que, com a variação do peso atribuído ao índice de desempenho econômico de 1 até 10, o índice de sustentabilidade (ISTUC) cresce de 6,3 a 6,9 para a operação DTE, que se mantém apresentando um alto nível de sustentabilidade. Entretanto, para as operações DTI e DTIA, há uma redução do valor estimado para o ISTUC: de 5,8 a 3,3 para a operação DTI e de 5,9 a 3,4 para a operação DTIA. Assim, as operações DTI e DTIA têm seu nível de sustentabilidade reduzido de médio a baixo, conforme aumenta o peso dado ao índice de desempenho econômico.

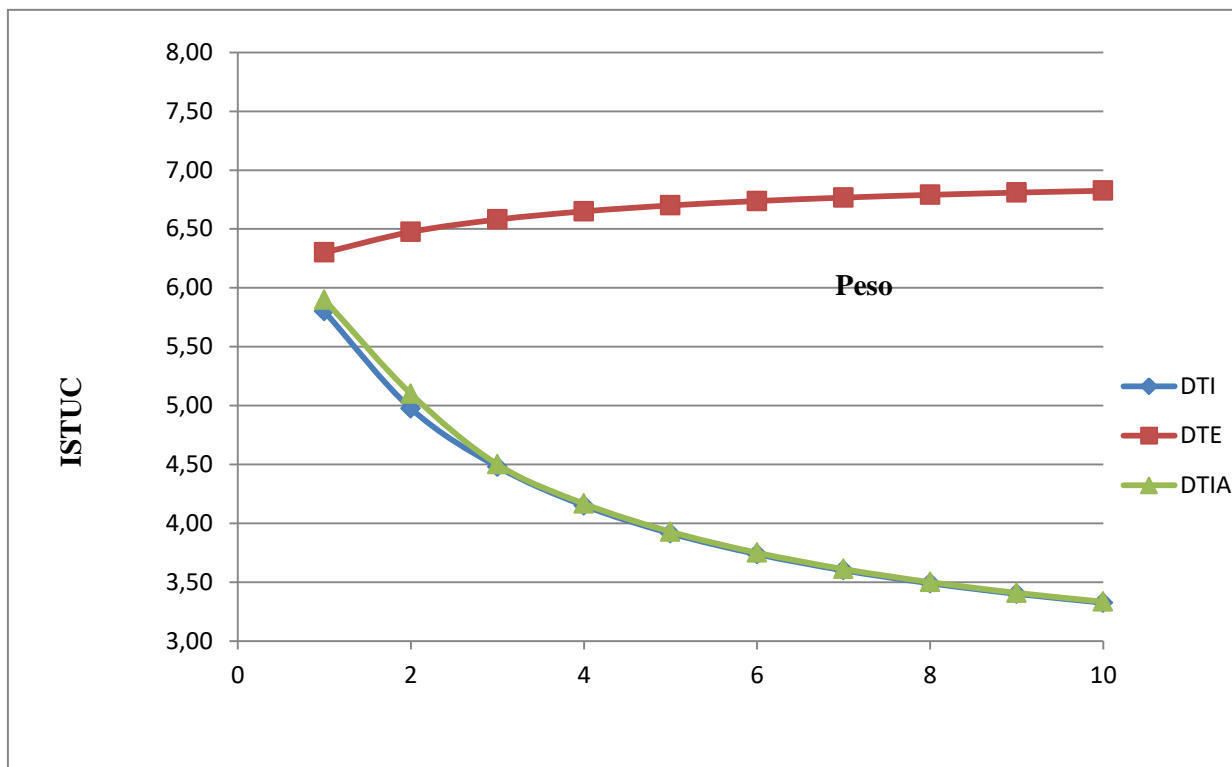


Figura 5-6: Análise de sensibilidade para o ISTUC, variando o peso do índice de desempenho econômico

A Figura 5.7 apresenta as variações no ISTUC motivadas por mudanças no peso do índice de desempenho social. Com a variação do peso atribuído ao índice de desempenho social de 1 até 10, verifica-se que os índices de sustentabilidade (ISTUC) das três operações diminuem: de 5,8 a 5,2 para a operação DTI, de 6,3 a 3,0 para a operação DTE e de 5,9 a 5,2 para a operação DTIA. Assim, as operações DTI e DTIA se mantêm com um nível de sustentabilidade médio, independentemente do peso dado pelo tomador de decisão ao critério social. Por sua vez, o nível de sustentabilidade da operação DTE pode variar de alto a baixo, à medida que o peso atribuído ao índice de desempenho social aumenta.

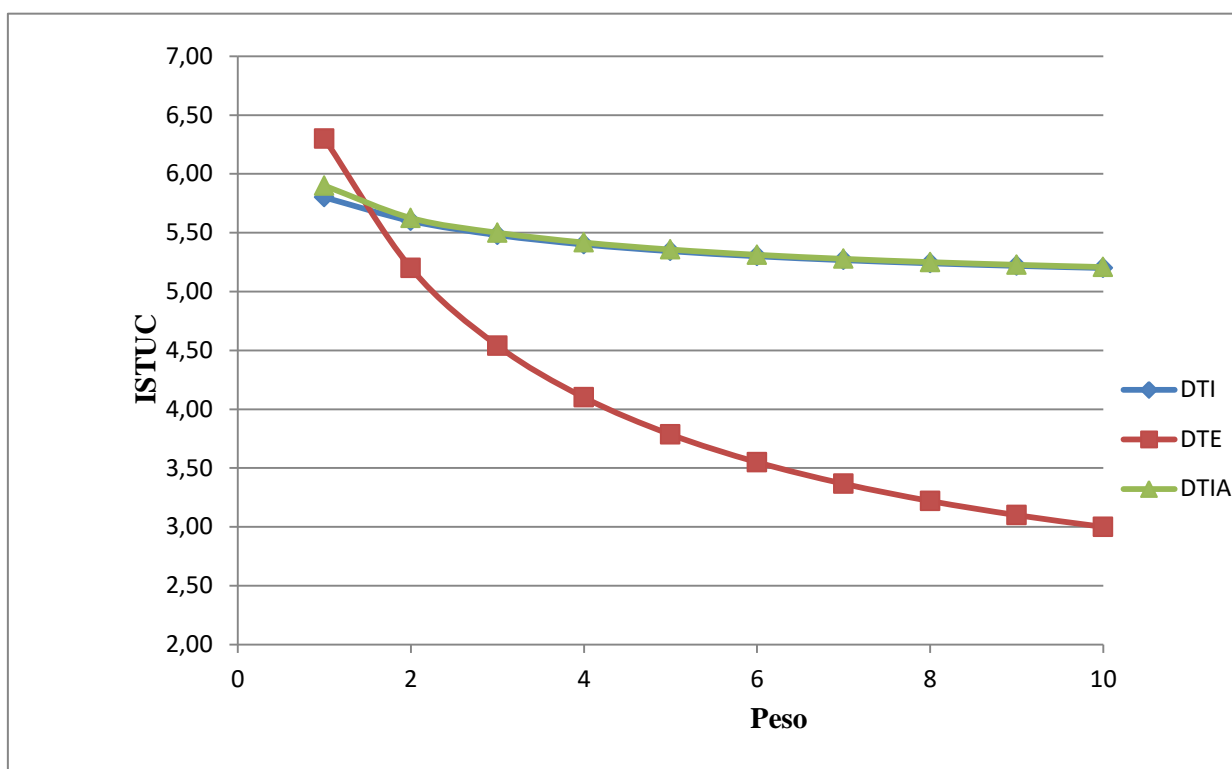


Figura 5-7: Análise de sensibilidade para o ISTUC, variando o peso do índice de desempenho social

Por meio da Figura 5.7, observa-se que variações no peso do índice de desempenho social, quando analisadas individualmente, alteram as pontuações do ISTUC ao ponto que a DTIA e DTI passam a apresentar um nível de sustentabilidade superior à operação DTE, ou seja, se uma maior importância é dada ao impacto social da operação, a DTE deixa de ser considerada mais sustentável do que a DTIA. Esse resultado reforça a importância de se escolher o peso certo para cada critério no processo de decisão e também destaca a relevância de se conduzir uma análise de sensibilidade em situações em que há incerteza quanto à definição da relevância de diferentes critérios.

Destaca-se que, quando o valor atribuído ao índice de desempenho social é 2 ou superior, a operação DTE deixa de ser considerada aquela com maior nível de sustentabilidade. Entretanto, conforme discutido previamente, é de se esperar que, na prática, os operadores de transporte atribuam um peso maior ao índice de desempenho econômico em relação aos demais critérios, uma vez que, segundo Mihaiu et al. (2010), esses atores têm como foco os

resultados econômicos. Devido a maior preocupação ambiental entre os consumidores, os operadores de transporte têm sido forçados a operar de modo mais sustentável (MACHARIS *et al.*, 2014), porém tentam atingir maior sustentabilidade por meio de ações que também tragam vantagens econômico-financeiras (Browne e Allen, 2011).

Portanto, a operação DTE continua sendo a mais indicada a ser implantada, por apresentar maior nível de sustentabilidade e desempenho ambiental e econômico. Este resultado corrobora os resultados apresentados por Cherry *et al.* (2009), que indicam que bicicletas elétricas e triciclos superam outros modos em quase todas as métricas ambientais.

Além disto, o estudo de caso mostra que o uso de veículos elétricos (tanto os triciclos elétricos, na operação DTE, quanto o veículo comercial leve elétrico do tipo BEV, na operação DTIA) como alternativa à distribuição postal da última milha na cidade do Rio de Janeiro foi capaz de promover benefícios econômicos e ambientais.

É importante salientar que a aplicação do procedimento proposto não é apenas útil para concluir pela alternativa de operação TUC mais sustentável, mas também demonstra os pontos fracos da operação avaliada em termos ambientais, econômicos e sociais, o que permite a proposta de medidas mitigadoras, melhorando ainda, quando implantadas, o desempenho da alternativa selecionada.

O estudo de caso confirma a consistência e aplicabilidade da metodologia proposta. As condições de subjetividade e incerteza da lógica *fuzzy* para resolver problemas do tipo analisado mostraram-se adequadas principalmente pela característica de flexibilidade em função da possibilidade de inserção ou retirada de variáveis de forma simples seguindo o procedimento de construção da arquitetura, possibilitando assim a avaliação das diferentes operações TUC. Ainda, devido a pouca divergência entre os resultados encontrados, comparando-se as avaliações e opiniões dos especialistas, pode-se inferir que a metodologia proposta permite tratar de modo adequado as incertezas e subjetividades existentes nos processos de hierarquização, para uma futura tomada de decisão.

Ressalta-se que a metodologia proposta pode ser aplicada para avaliar qualquer outro conjunto de alternativas de operações sustentáveis de transporte urbano de carga, desde que os dados necessários para a estimativa dos indicadores e índices de sustentabilidade propostos para o TUC estejam disponíveis ou possam ser medidos. Por exemplo, também no segmento de operação postal, Choubassi *et al.* (2016) avaliaram a viabilidade econômica de substituir os veículos do serviço postal dos Estados Unidos por bicicletas de carga para realizar a distribuição de correspondência na última milha. A metodologia proposta poderia ser aplicada a este estudo de caso específico, de modo a avaliá-lo em uma análise mais abrangente, considerando não apenas a viabilidade econômica, como também os três pilares da sustentabilidade.

Em outro exemplo, Oliveira *et al.* (2014) avaliaram os benefícios financeiros e ambientais do uso da tecnologia de acionamento híbrido diesel-hidráulico em caminhões usados para coleta de resíduos urbanos, em termos de aspecto monetário e emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos locais (CO, NMHC, NOx e PM). No entanto, além desses dados, os autores (2014) também apresentaram informações relativas ao consumo de combustível, velocidade média e volume transportado. Portanto, o índice composto também poderia ser usado para avaliar a viabilidade dessa operação. Enfim, a metodologia proposta pode ser aplicada para avaliar a aplicação de qualquer uma das vinte iniciativas sustentáveis para o transporte urbano de carga, apresentadas no Capítulo 2.

6 CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta tese se propôs a desenvolver uma metodologia para avaliação da sustentabilidade de operações de transporte urbano de carga, sob a perspectiva de operadores de transporte. Portanto, o trabalho foi estruturado de modo a responder às seguintes questões de pesquisa:

- Quais são os critérios que os operadores de transporte devem avaliar para selecionar a iniciativa de TUC mais indicada para aumentar seu nível de sustentabilidade?
- Existem indicadores ou um índice que permitam esta análise?
- Quais são os passos a seguir para a avaliação da sustentabilidade de operações de TUC sob a perspectiva dos operadores de transporte?

Para abordar as duas primeiras questões de pesquisa, foi desenvolvida uma revisão bibliográfica sistemática a fim de identificar publicações que propõem indicadores de transporte sustentáveis específicos para o transporte urbano de carga, e se as mesmas propuseram um índice de sustentabilidade para avaliação do TUC. No entanto, não foram encontradas, por meio desta RBS, pesquisas sobre esta temática. Assim, não foi possível identificar os critérios que os operadores de transporte avaliam para selecionar, entre alternativas de operação de TUC, aquela com maior nível de sustentabilidade, tampouco um índice composto que possibilite essa análise em relação ao TUC. Este resultado reforça o caráter inovador desta pesquisa, que propõe um conjunto de indicadores sustentáveis e um índice para avaliação da sustentabilidade do TUC.

Devido aos resultados desta RBS, o escopo da revisão de literatura foi ampliado, considerando publicações sobre indicadores de sustentabilidade de transporte (STI) de forma geral, não se limitando àqueles que consideravam o TUC. Deste modo, identificou-se um conjunto de indicadores STI, que foram adaptados para avaliar a sustentabilidade de operações de transporte urbano de carga. Com isto, foi possível atingir o segundo objetivo específico desta tese, que consistia em propor indicadores de sustentabilidade específicos para o TUC. Tais indicadores são a base para o desenvolvimento do índice de sustentabilidade para o transporte urbano de carga, também proposto nesta tese.

Entretanto, a principal contribuição desta tese consiste na proposta de uma metodologia para avaliar a sustentabilidade de operações de transporte urbano de carga, considerando a perspectiva de operadores de transportes, usando o conceito de lógica *fuzzy* e métodos de análise hierárquica. Por um lado, a lógica *fuzzy* permite incorporar o conhecimento de especialistas em meio ambiente e transportes no processo, considerando, assim, a subjetividade e as incertezas envolvidas neste tipo de avaliação. Por outro lado, métodos de análise hierárquica permitem adotar pesos diferentes para indicadores distintos. Além disso, uma análise de sensibilidade é realizada para determinar como os diferentes pesos atribuídos às variáveis de entrada e/ou intermediárias influenciam o ranqueamento de prioridade e, portanto, a decisão final.

A metodologia proposta apresentou-se adequada para tratar o problema de hierarquização de operações alternativas de transporte urbano de carga, baseada no nível de sustentabilidade que estas apresentam. Conforme apontado por Filippo *et al.* (2011), os métodos de hierarquização tradicionais nem sempre conseguem trabalhar adequadamente com questões que envolvam a análise de aspectos subjetivos e qualitativos. Desta forma, pode-se concluir que a teoria da lógica *fuzzy* em associação com métodos de análise hierárquica pode ser aplicada para a avaliação da sustentabilidade de operações TUC.

Por meio do modelo hierárquico-*fuzzy* proposto, pode-se estimar um índice composto (ISTUC), que mede aspectos multidimensionais da sustentabilidade que não poderiam ser completamente abordados apenas por indicadores individuais. Indo além da abordagem tradicional que se limita à consideração de atributos financeiros e nível de serviço para avaliar o desempenho do transporte de carga, este índice composto busca conciliar aspectos econômicos, ambientais e sociais para avaliar e selecionar a operação de transporte urbano de carga mais sustentável.

Além disto, o índice limita a quantidade de informações apresentadas, permitindo que embarcadores, empresas e operadores de transporte façam comparações rápidas e fáceis para avaliar configurações alternativas para suas cadeias de distribuição e, em seguida, classificá-las em termos de sustentabilidade. Consequentemente, os operadores de transporte podem adotar a metodologia proposta como uma ferramenta para avaliar sua própria cadeia de distribuição e identificar configurações mais sustentáveis para suas entregas urbanas,

melhorando assim a tomada de decisão geral. Portanto, a metodologia desenvolvida é de fundamental importância em uma sociedade cada vez mais consciente em relação à necessidade de promover ações que estimulem a utilização dos recursos disponíveis no presente, sem comprometer a sua disponibilidade no futuro (MCKINNON et al., 2010). A questão da sustentabilidade se torna cada vez mais relevante, de modo que a implantação de práticas que buscam conciliar a maximização dos lucros e o aumento do nível de serviço com seu desempenho socioambiental é uma questão de sobrevivência no mercado para empresas, que se veem obrigadas a implantar tais medidas, seja por pressão do mercado ou por legislação específica. Reforça-se assim a importância da metodologia proposta.

Com o intuito de confirmar a consistência e aplicabilidade da metodologia proposta, optou-se por aplicá-la a um estudo de caso. A metodologia proposta foi aplicada para analisar o uso de triciclos elétricos e também de veículo comercial leve elétrico como alternativas para a distribuição postal em *last mile*, em um estudo de caso de uma empresa pública, que atua neste segmento, na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. A relevância do caso analisado é corroborada pela tendência, identificada pela RBS desenvolvida por Oliveira *et al.* (2017), pela adoção de bicicletas/triciclos e de veículos comerciais leves elétricos no transporte urbano de carga, bem como devido à carência de estudos que quantifiquem o efeito global de tais tecnologias.

Atualmente, a distribuição postal é realizada a pé com apoio de carrinho de mão e bolsa própria, além da utilização do ônibus convencional e o apoio operacional de um veículo comercial leve com motor à combustão (DTI). Porém, foram avaliadas duas alternativas de operação: (i) a Distribuição Tradicional Intermodal alternativa (DTIA), que ocorre tal como a operação DTI, porém com a substituição do veículo comercial leve com motor a combustão por um veículo comercial leve elétrico do tipo BEV; e (ii) a Distribuição com apoio de triciclo elétrico. Para avaliar esta última alternativa, foram realizados experimentos onde as entregas nos bairros do Leme e Copacabana, na cidade do Rio de Janeiro, Brasil, foram realizadas por triciclos elétricos durante o período de duas semanas.

Os resultados da aplicação da metodologia proposta ao caso analisado indicou a operação com o uso de triciclos elétricos como a mais sustentável em comparação às operações DTI e DTIA. Vale ressaltar que, enquanto a operação DTE teve um nível de sustentabilidade alto,

ambas as operações DTIA e DTI apresentaram um nível de sustentabilidade médio. Entretanto, a DTE apresentou um baixo nível de desempenho social, sendo considerado apenas o indicador de renda gerada, porém seu desempenho ambiental e econômico foi superior às demais. Este resultado corrobora o estudo de Cherry *et al.* (2009), que indicam que bicicletas e triciclos elétricos têm desempenho ambiental superior aos demais modos.

Além disso, o estudo de caso indicou que, embora os indicadores de sustentabilidade para o TUC, propostos nesta tese, possam ser utilizados como variáveis de entrada para o modelo hierárquico-*fuzzy*, o procedimento possibilita adaptações se as características da operação avaliada e a disponibilidade dos dados assim o exigirem. Por exemplo, devido à carência de dados sobre o TUC no Rio de Janeiro, mudanças nas unidades de medida inicialmente propostas para alguns indicadores foram necessárias para esta aplicação. Isso não invalida a metodologia proposta e nem a aplicação apresentada, uma vez que as alterações foram realizadas de forma coerente e padronizada para todos os indicadores analisados, de modo que seguem permitindo a comparação entre as diferentes operações TUC. Entretanto, isto reforça ainda mais a importância de estudos e da medição de dados e estatísticas sobre o TUC.

É importante destacar que, embora o estudo de caso apresentado tenha sido selecionado para aplicação da metodologia proposta, esta não é específica para a avaliação de operações postais. O estudo de caso confirma a consistência e aplicabilidade da metodologia proposta, de modo que esta pode ser aplicada para avaliar, em termos de sustentabilidade, configurações alternativas de qualquer outra cadeia de distribuição em áreas urbanas. De fato, a metodologia proposta pode ser aplicada, em uma avaliação comparativa, para praticamente qualquer conjunto de alternativas de operações de transporte urbano de carga, como entregas de centros de distribuição a lojas, entregas domiciliares de comércio eletrônico ou até para analisar alternativa de coleta de lixo urbano. Desta maneira, a metodologia proposta poderia ser adotada para avaliar a aplicação de qualquer uma das vinte iniciativas sustentáveis para o transporte urbano de carga apresentadas no Capítulo 2 desta tese, identificadas com base em VREF Center of Excellence for Sustainable Urban Freight Systems, o BESTUFS, o Smart Freight Center e o PLVB (Implantação de centros de consolidação de carga em área urbana; Implantação de centros de distribuição em área urbana; Implantação de equipamento auxiliar de geração de energia para redução de consumo de combustível fóssil; Implantação de

equipamento de controle das emissões dos veículos; Manutenção preventiva dos veículos; Otimização da taxa de ocupação do veículo; Otimização da operação de carga e descarga com utilização de equipamentos motorizados; Otimização das rotas; Promoção de melhoria da aerodinâmica dos veículos; Coleta e distribuição noturna; Realização de transferência do transporte de carga para modos mais limpos (transferência modal); Redução do peso dos veículos; Renovação e modernização da frota; Eco-driving; Utilização de aditivos para melhorar a eficiência energética dos combustíveis; Utilização de diferentes tipos de veículos para realização de entregas e coletas; Utilização de fontes de energia mais limpas; Utilização de sistemas de informação para rastreamento e acompanhamento da frota; Utilização de sistemas de propulsão alternativos; Utilização de veículos com maior eficiência energética).

Portanto, a aplicação da metodologia proposta para avaliar diferentes estudos de caso pode ser objeto de pesquisa para estudos futuros. Ademais, apesar de o estudo de caso indicar a adoção de triciclos elétricos como a opção mais sustentável, esta implica em outras questões que exigem mais estudos. A adoção de veículos menores para a distribuição urbana requer um maior número de viagens, sendo necessário avaliar o impacto desta medida no nível de congestionamento de tráfego. Também há campo para novos estudos que analisem como o crescimento de veículos elétricos pode ser integrado à cadeia de suprimentos e como esta pode ser uma oportunidade de cooperação entre todos os *stakeholders*.

Finalmente, conclui-se que a metodologia proposta é simples, flexível e de grande aplicabilidade, podendo ser adotada na avaliação da sustentabilidade de outras operações de TUC, desde que os dados necessários estejam disponíveis. O índice proposto (ISTUC) pode ser adotado para auxiliar os operadores de transporte a selecionar, entre as possíveis alternativas, a configuração de suas cadeias de distribuição. Ainda, este índice também pode ser usado para *benchmarking* entre diferentes operadores de transporte urbano de carga. Assim, os clientes poderiam adotar o índice em seu processo de tomada de decisão em relação à seleção de operadores de transporte. Além disso, o ISTUC pode ser aplicado como base para o desenvolvimento de um padrão de sustentabilidade e um programa de certificação para o TUC. Esse programa reconheceria os participantes que atingissem um nível mínimo de sustentabilidade. Com base nos indicadores e no índice de sustentabilidade propostos, metas específicas seriam definidas para diferentes níveis de desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALESSANDRINI, A.; CAMPAGNA, A.; SITE, P.D.; FILIPPI, F. e PERSIA, L. “Automated Vehicles and the Rethinking of Mobility and Cities”. *Transportation Research Procedia*, v. 5, p.145 – 160, 2015.
- ALLEN, J. e BROWNE, M. “Sustainability strategies for city logistics”, In: A. McKinnon, S. Cullinane, M. Browne, A. Whiteing. (Eds.) *Green logistics: improving the environmental sustainability of logistics*, KoganPage, London, p. 282-305, 2010.
- ANAND, QUAK, VAN DUIN *et al* “City logistics modeling efforts: Trends and gaps – A review”, *Procedia – Social and Behavioral Sciences* v. 39, pp. 101-115, 2012.
- ANDALORO, L., NAPOLI, G., SERGI, F., MICARI, S., AGNELLO, G., ANTONUCCI, V. *Development of a new concept electric vehicle for last mile transportation*. EVS28 Int. Electr. Veh. Symp. Exhib. 1–7, 2015.
- ANDERLUH, A., HEMMELMAYR, V.C., NOLZ, P.C. “Synchronizing vans and cargo bikes in a city distribution network”, *Central European Journal of Operations Research*. Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- ANDRADE, C.E.S. *Avaliação da emissão de dióxido de carbono e do seu consumo de energia no ciclo de vida de sistemas metroferroviários de passageiros: aplicação na linha 4 do metrô do Rio de Janeiro*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.
- APPLETON, B. AND DAVIES, M. *SMART transportation ranking report*, Green Apple Canada, 2008.
- ARVIDSSON, N., WOXENIUS, J., LAMMGA, C. “Review of Road Hauliers’ Measures for Increasing Transport Efficiency and Sustainability in Urban Freight Distribution”. *Transport Reviews*, v. 33, n.1, p. 107-127, 2013.
- AWASTHI, A. e CHAUHAN, S. “A hybrid approach integrating Affinity Diagram, AHP and fuzzy TOPSIS for sustainable city logistics planning”. *Applied Mathematical Modelling*, v.36, p. 573–584, 2011. doi:10.1016/j.envsoft.2010.11.010
- AWASTHI, A., CHAUHAN, S., OMRANI, H. “Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems.” *Expert Systems with Applications*, v. 38 pp. 12270-12280, 2011.
- BANCO MUNDIAL (2015) *World Development Indicators: Urbanization*. Disponível em: <http://wdi.worldbank.org/table/3.12>. Acesso em: 24 set. 2017.
- BARTH, M. e BORIBOONSOMSIN, K. “Real-World CO2 Impacts of Traffic Congestion”, *Transportation Research Registro 2058*, pp. 163-171, 2008
- BECHEIKH, N., LANDRY, R. e AMARA, N. “Lessons from innovation empirical studies in the manufacturing sector: A systematic review of the literature from 1993-2003”, *Technovation* v. 26, pp. 644-664, 2006. doi:10.1016/j.technovation.2005.06.016
- BEHRENDTS, S. (2016). Recent developments in urban logistics research – A review of the proceedings of the international conference on city logistics 2009 – 2013. *Transportation Research Procedia*, 12, 278-287.

- BITAR, O.Y.; ORTEGA, R.D. Gestão Ambiental. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), cap. 32, p.499-508, 1998.
- BOAS, C. L.V. *Modelo Multicritério de Apoio à Decisão Aplicado ao Uso Múltiplo de Reservatórios: Estudo da Barragem do Ribeirão João Leite*. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade de Brasília, 2006.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI (2016). Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Volume I. Disponível em: <sirene.mcti.gov.br/publicacoes>. Acesso em: 05/9/2016.
- BROWNE, A. e ATTILASSY, K. “Comparing freight transport strategies and measures in London and Paris”, *International Journal of Logistics: Research and Applications*, v. 10, n.3, pp. 205-219, 2007.
- BROWNE, M. e ALLEN, A. “Enhancing the sustainability of urban freight transport and logistics.” *Transport and Communications Bulletin for Asia and the Pacific*, 80, p. 1-19, 2011.
- BRUNDTLAND COMMISSION, *Our Common Future*. Oxford, Oxford University Press, 1987.
- BUSSAB, W. O. e MORETTIN, P. A. *Estatística Básica* – 4ª Ed, Atual Editora, 1987.
- Calculadora Global (tool.globalcalculator.org), desenvolvida pela Comunidade de Conhecimento e Inovação Climática (CLIMATE-KIC) e a Agência Internacional de Energia (International Energy Agency). Disponível em <http://tool.globalcalculator.org>. Acesso em Outubro 2018.
- CAMPOS, V., RAMOS, R. e CORREIA, D. “Multi-criteria analysis procedure for sustainable mobility evaluation in urban areas.” *Journal of Advanced Transportation*, v. 43 (4), pp. 371-390, 2009.
- CASTILLO H. e PITFIELD D. E. ‘ELASTIC –a methodological framework for identifying and selecting sustainable transport indicators’, *Transportation Research Part D*, 2009.
- CHAABANE, A., RAMUDHIN, A. e PAQUET M. “Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme”, *Int. J. Production Economics* v.13, pp. 37-48, 2012. Doi:10.1016/j.ijpe.2010.10.025
- CHERRY, C.R., WEINERT, J.X. e XINMIAO, Y. “Comparative environmental impacts of electric bikes in China.” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 14, 281–290, 2009. doi.org/10.1016/j.trd.2008.11.003
- CHOUBASSI, C., SEEDAH, D., JIANG, N., WALTON, C. “Economic analysis of cargo cycles for urban mail delivery.” *Transportation Research Record*, v. 2547, p. 102-110, 2016.
- CNT, Logística urbana: restrições aos caminhões, Brasília –CNT, 2018
- CONFORTO, E.C., AMARAL, D.C. e SILVA, S.L. *Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos*. In: 8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto – CBGP 2011, Porto Alegre. Artigo. Porto Alegre: CBGP, 2011. p. 1 – 12.
- COOK, D.J., MULROW, C.D. e HAYNES, R.B. “Systematic reviews: synthesis of best evidence for clinical decisions”, *Annals of Internal Medicine* v.126, n.5, pp. 376-380, 1997.
- CORDEIRO A.M., OLIVEIRA, G.M., RENTERÍA, J.M., GUIMARÃES, C.A. “Revisão sistemática: uma revisão narrativa.” *Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgiões*, v. 34, n. 6, p. 428-431, 2007.
- Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP). CSCMP Glossary, 2007. Disponível em: https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx. Acesso em Setembro, 2018.

- CRAINIC, T. G., RICCIARDI, N. e STORCHI, G. “Advanced freight transportation systems for congested urban areas”, *Transportation Research Part C* v.12, pp. 119–137, 2004.
- CRAINIC, T. G., RICCIARDI, N. e STORCHI, G. “Advanced freight transportation systems for congested urban areas”, *Transportation Research Part C* v.12, pp. 119–137, 2004.
- CRUZ, I. *Desenvolvimento de um índice global para avaliação do desempenho ambiental de sistemas de transporte de carga*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Rio de Janeiro – PET –COPPE, 2011.
- CURY, M. V. Q., *Modelo Heurístico Neuro-Fuzzy para Avaliação Humanística de Projetos de Transporte Urbano*, Tese (Doutorado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.
- DA SILVA, D.; BANDEIRA, R., CAMPOS, V. Avaliando a sustentabilidade alcançada por meio de entregas noturnas: o caso da distribuição de combustíveis na cidade do Rio de Janeiro, *Transportes*, v.25, n. 2, 2018.
- DABLANC L. *Freight transport for development toolkit: Urban Freight*, 2009.
- DABLANC, L. “Goods transport in large European cities: difficult to organize, difficult to modernize.” *Transportation Research Part A*. v. 41, pp. 280 – 285, 2007.
- D'AGOSTO, M. A., GONÇALVES, D.N. S. E GOES, G., V., (2018) *Cenários de Emissão de Gases de Efeito Estufa até 2050 no Setor de Transportes: Referência e 1,5°C*, in ROVERE, E. L.L.; WILLS, W.; DUBEUX, C. B. S; PEREIRA JR, A. O.; D'AGOSTO, M. A; WALTER, M. K. C; GROTTERRA, C.; CASTRO, G.; SCHMITZ, D.; HEBEDA, O.; LOUREIRO, S. M.; OBERLING, D; GESTEIRA, C.; GOES, G.V.; ZICARELLI, I.F.; E OLIVEIRA, T.J.P (2018). *Implicações Econômicas e Sociais dos Cenários de Mitigação de GEE no Brasil até 2050: Projeto IES-Brasil, Cenário 1.5 ° C*. COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.
- D'AGOSTO, M. E RIBEIRO, S. “Assessing total and renewable energy in Brazilian automotive fuels. A life cycle inventory (LCI) approach.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 6–7, pp. 1326–1337, 2009.
- DALALAH, D., HAYAJNEH, M., e BATIEHA, F. “A fuzzy multi-criteria decisionmaking model for supplier selection.” *Expert Systems with Applications*, 38(7), 8384–8391, 2011.
- DAMPIER, A. e MARINOV, M., “A Study of the Feasibility and Potential Implementation of Metro-Based Freight Transportation in Newcastle upon Tyne”. *Urban Rail Transit* 1, 164–182, 2015.
- DEMOGRAPHIA. (2016). *12th Annual Demographia International Housing Affordability Survey*. <<http://www.demographia.com/dhi.pdf>> Accessed in September 22, 2016.
- DIZIAIN, D., TANIGUCHI, E., DABLANC, L. “Urban Logistics by Rail and Waterways in France and Japan.” *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 125, 159–170, 2014.
- DOMÍNGUEZ, A., HOLGUÍN-VERAS, J., IBEAS, A. *et al* “Receivers’ response to new urban freight policies”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* v. 54, pp. 886 – 896, 2012.
- DOODY, D.G., KEARNEY, P., BARRY, J., MOLES, R., O'REGAN, B. “Evaluation of the Q-method as a method of public participation in the selection of sustainable development indicators.” *Ecological Indicators*, v. 9, 1129–1137, 2009.

- ECOSTART. *Bicicletas e Triciclos Elétricos*. Disponível em: <<http://ecostart.com.br/information/index/sobre-a-ecostart>>. Acesso em Novembro 2016.
- EGILMEZ, G., GUMUS, S. e KUCUKVAR, M. “Environmental sustainability benchmarking of the U.S. and Canada metropolises: An expert judgment-based multi-criteria decision making approach.” *Cities*, 42, p. 31-41, 2015.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2017. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2017.
- FACCIO, M. e GAMBERI, M. “New city logistics paradigm: From the “Last Mile” to the “Last 50 Miles” sustainable distribution.” *Sustainability*, 7, 14873–14894, 2015.
- FERNANDES, G. *Impacto da Mobilidade Urbana na Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. Monografia, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil, 2015a.
- FERNANDES, A.F.; D'AGOSTO, M.A. e MARUJO, L.G. “The use of tricycles in the physical distribution of beverages in Rio de Janeiro city. A qualitative approach of the operation.” *Revista de Engenharia e Tecnologia*, volume 7, p. 136 – 151, 2015b.
- FERNANDES, V.A.; D'AGOSTO, M.A; OLIVEIRA, C.M.; ASSUMPÇÃO, F.C.e DEVEZA, A.C.P (2015c). “Eco-driving: uma ferramenta para aprimorar a sustentabilidade do transporte de resíduos urbanos.” *Transportes*, volume 23, p. 1-8, 2015c.
- FILLIPO, S. *Metodologia para Gerenciamento do Passivo Ambiental de Rodovias Utilizando Métodos de Apoio a Tomada De Decisão*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- FILLIPO, S., RIBEIRO, P. C. M. e RIBEIRO, S. K. “A Fuzzy Multi-Criteria Model applied to the management of the environmental restoration of paved highways.” *Transportation Research - Part D*, v. 12, n.6, pp. 423–436, 2007.
- FOLTYŃSKI, M. “Electric Fleets in Urban Logistics.” *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 151, 48–59, 2014.
- FONTAINHA, T. C. F. *Estratégias de colaboração na resposta a desastres: um framework e uma aplicação*. Tese de Doutorado, PUC/RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2018.
- FUSCO, C. *Estudo Comparativo Entre Investimentos No Mercado De Ações E Fundos De Ações: Uma aplicação do método AHP*. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 33, 2013, Salvador. Artigo.Salvador: Enegep, 2013. p. 1 – 12.
- FÜSSLER, J.; SHARMA, S.e BAKKER, S. *Reference document on Measurement, Reporting and Verification in the Transport Sector. Final Report*. February, 2016.
- GILBERT, R., IRWIN, N. e HOLLINGWORTH, B. *Sustainable Transportation Performance Indicators (STPI)*, Transportation Research Board (TRB), CD ROM, 2003.
- GONÇALO, C.S; CASTRO, C.M.; BONON, M.M., MOTTA, P.M.R., DAHDAL, A.B., BATISTA, J.C., HIRAYAMA, M.S., PERES, S.M.P. e BARROS, N.F. “Planejamento e execução de revisões sistemáticas da literatura.” *Brasília Med.*, n. 49, n. 2, p. 104-110, 2012.
- GOUDARD, B., 2001, *Avaliação Ambiental de Alternativas de Projetos de Transporte Rodoviários com o Uso da Lógica Fuzzy*, Dissertação de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- GRANDZOL, J. R. Improving the Faculty Selection Process in Higher Education: a case for the analytic hierarchy process. *IR Applications*, v. 6, 13 p., 2005. Disponível em: <<http://airweb.org/images/IRApp6.pdf>>. Acesso em: 21 maio 2010.
- GREENPEACE. [R]Evolução Energética, Rumo a um Brasil com 100% de energias limpas e renováveis. Cenário 2016, Greenpeace Brasil, São Paulo, SP
- GRUBER, J. e KIHM, A. “Reject or embrace? Messengers and electric cargo bikes.” *Transportation Research Procedia*, volume 12, p. 900 – 910, 2016.
- GRUBER, J.; KIHM, A e LENZ, B. “A new vehicle for urban freight? An ex-ante evaluation of electric cargo bikes in courier services.” *Research in Transportation Business & Management*, v. 11, p. 53–62, 2014.
- HAGHSHENAS, H. e VAZIRI, M. “Urban sustainable transportation indicators for global comparison.” *Ecological indicators*, v. 15, pp. 115-121, 2012.
- HAGHSHENAS, H., VAZIRI e M. GHOLAMIALAM, A. “Evaluation of sustainable policy in urban transportaion using system dynamics and world cities data: a case study in Isfahan.” *Cities*, v. 45, pp. 104-115, 2015.
- HEITZ, A e BEZIAT, A. “The parcel industry in the spatial organization of logistics activities in the Paris Region: inherited spatial patterns and innovations in urban logistics systems.” *Transportation Research Procedia*, v. 12, p. 812 – 824, 2016.
- HENSHER, D., PUCKETT, S. Refocusing the modelling of freight distribution: Development of an economic-based framework to evaluate supply chain behaviour in response to congestion charging. *Transportation*, v. 32, p. 573–602, 2005.
- HEZRI, A.A. e HASAN, M.N. “Management framework for sustainable development indicators in the state of Selangor, Malaysia.” *Ecological Indicators*, 4, 287–304, 2004.
- HINDE, S. e DIXON, J. “Changing The Obesogenic Environment: insights from a cultural economy of car reliance.” *Transportation Research D*, v. 10, pg. 31 – 53, 2005.
- Holguín-Veras, J. Improving Freight System Performance in Metropolitan Area. Transforming Transportation, 2015. Disponível em: <http://pt.slideshare.net/EMBARQNetwork/improving-freight-system-performance-in-metropolitan-areas-jos-holgun-vref-center-of-excellence-for-sustainable-urban-freight-systems-transforming-transportation-2015> (Capturado em 20 de março de 2016)
- HOLGUÍN-VERAS, J. The truth, the myths and the possible in freight road pricing in congested urban areas. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, v. 2, p. 6366–6377, 2010.
- HOLGUÍN-VERAS, J., WANG, C., BROWNE, M., HODGE, S. AND WOJTOWICZA, J. The New York City Off-Hour Delivery Project: Lessons for City Logistics. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 125, p. 36 – 48, 2014.
- IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Anual de Serviços 2014 e Série Atualizada de 2012-2013*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, RJ, 2014.
-
- População nos Censos Demográficos, Segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação - 1972/2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=4&uf=00>>. Acesso em: 18 out. 2017.

- IGNACCOLO, M., INTURRI, G., LE PIRA, M., CAPRI, S. e MANCUSO, V. "Evaluating the role of land use and transport policies in reducing the transport energy dependence of a city." *Research in Transportation Economics*, v. 55 (2016), pp. 60-66, 2016.
- INEA. *Relatório da qualidade do ar do Estado do Rio de Janeiro – ano base 2014*, Instituto Estadual do Meio Ambiente, Rio de Janeiro, RJ, 2015.
- JALLER, M., SÁNCHEZ, S., GREEN, J. e FANDIÑO, M. "Quantifying the impacts of sustainable city logistics measures in the Mexico City Metropolitan Area." *Transportation Research Procedia*, v. 12, pp. 613 – 626, 2016. doi: 10.1016/j.trpro.2016.02.015
- JEON, C. e AMEKUDZI, A. "Addressing sustainability in transportation systems: definitions, indicators, and metrics." *Journal of Infrastructure Systems* – ASCE., 2005.
- JOLLANDS, N., LERMIT, J. e PATTERSON, M. "The Usefulness of Aggregate Indicators in Policy Making and Evaluation: A Discussion with Application to Eco-efficiency Indicators in New Zealand." *Economics and Environment Network*. Australian National University, 2003
- JOUMARD R, GUDMUNDSSON H e FOLKESON L. "Framework for assessing indicators of environmental impacts in the transport sector." *Transport Res Rec: J Transport Res Board*, 2242:55-63 2011.
- KARLSSON, C; NORR, C. "Total Effectiveness in a Just - in - Time System". *International Journal of Operations & Production Management*, 14(3), 46-65, 1994.
- KIN, B., VERLINDE, S., MOMMENS, K. e MACHARIS, C. "A stakeholder-based methodology to enhance the success of urban freight transport measures in a multi-level governance context." *Research in Transportation Economics*, v. 65, p. 10-23, 2017.
- LAKATOS, E. e MARCONI, M. *Fundamentos de Metodologia Científica*. Atlas: São Paulo, 2010.
- LANG, A. *As ferrovias no Brasil e avaliação econômica de projetos: uma aplicação em projetos ferroviários*. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UNB, Brasília- DF, 154 p, 2007.
- LEBEAU, P., DE CAUWER, C., VAN MIERLO, J., MACHARIS, C., VERBEKE, W. e COOSEMANS, T. "Conventional, Hybrid, or Electric Vehicles: Which Technology for an Urban Distribution Centre?" *Sci. World J.*, 2015.
- LEBEAU, P., MACHARIS, C., VAN MIERLO, J. e MAES, G. "Implementing electric vehicles in urban distribution: A discrete event simulation." *World Electr. Veh. J.* 6, 38–47, 2013.
- LEITE, I.M.S. e FREITAS, F.F. *Análise Comparativa Dos Métodos De Apoio Multicritério A Decisão: Ahp, Electre E Promethee*. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 32., 2012, Bento Gonçalves. Artigo. Bento Gonçalves: Enegep, 2012. p. 1 - 11.
- LEONARDI, J., BROWNE, M. e ALLEN, J. "Before-after assessment of a logistics trial with clean urban freight vehicles: A case study in London", *Procedia - Social and Behavioral Sciences* v. 39, pp. 146 – 157, 2012.
- LI, F., LIU, X., HU, D., WANG, R. e YANG, W. "Measurement indicators and an evaluation approach for assessing urban sustainable development: a case study for China's Jining City." *Landscape and Urban Planning*, 90, 134–142, 2009.

- LIMA, ; LOBO, . Custos Logísticos no Brasil, 2014. Disponível em: <http://www.ilos.com.br/web/custos-logisticos-no-brasil/>. Acesso em Setembro, 2018.
- LIMA, M.S.; SOARES, B.G.O. e BACALTCHUK, J. “Psiquiatria baseada em evidências.” *Revista Brasileira de Psiquiatria*, v. 22, n. 3, p. 142-46, 2000.
- LINDHOLM, M. e BEHREND, S. “Challenges in urban freight transport planning – a review in the Baltic Sea Region.” *Journal of Transport Geography*, v. 22, p. 129–136, 2012.
- LISBOA, M. V. *Contribuição para a tomada de decisão na classificação e seleção de alternativas de traçado para rodovias em trechos urbanizados*, Dissertação de Mestrado, POLI/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2002.
- LITMAN, T. *Sustainable transportation indicators, Sustainable Transportation Indicators*. Subcommittee of the Transportation Research Board, 2008.
- LITMAN, T. *Sustainable transportation indicator data quality and availability*, Victoria Transport Policy Institute, 2009a.
- LITMAN, T. *Well measured developing indicators for comprehensive and sustainable transport planning*, Victoria Transport Policy Institute, 2009b.
- MACHARIS, C., MELO, S. “City Distribution and Urban Freight Transport: Multiple Perspectives.” Edward Elgar Publisher, Cheltenham, 2011.
- MACHARIS, C., WOXENIUS, J. e LIER, T. *The 4 A's of Sustainable Logistics*. Emerald, 2014.
- MAGAMANN, C. Are trucking companies going green?, 2014. Disponível em: <https://www.triplepundit.com/2014/12/trucking-companies-going-green/>. Acesso em: Setembro, 2018.
- MANCINI, M. e SAMPAIO, R. “Quando o objeto de estudo é a literatura: estudos de revisão.” *Revista Brasileira de Fisioterapia*, v. 10, n. 4, 2006. doi.org/10.1590/S1413-35552006000400001
- MARAVAS, A. PANTOUVAKIS, J. e LAMBROPOULOS, S. “Modeling uncertainty during Cist Benefit Analysis of transportation projects with the aid of fuzzy set theory.” *Transport Research Arena – Europe 2012. Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2012.
- MARGARITIS, D.; ANAGNOSTOPOULOU, A.; TROMARAS, A. e BOILE, M. “Electric commercial vehicles: Practical perspectives and future research directions.” *Research in Transportation Business & Management*, 2016.
- MARINS, C. S.; SOUZA, D. e BARROS, M. S. O. *Uso do Método de Análise Hierárquica (AHP) na Tomada de Decisões Gerenciais – Um Estudo de Caso*. Disponível em: <http://www2.ic.uff.br/~emitacc/AMD/Artigo%204.pdf> > Acesso em: 04.04.2013. 1779 p. e 1780p.
- MASCARENHAS, A., COELHO, P., SUBTIL, E. e RAMOS, T.B. “The role of common local indicators in regional sustainability assessment.” *Ecological Indicators*, 10, 646–656, 2010.
- MCKINNON, A. C., BROWNE, M., e WHITEING, A. E. *Green logistics: improving the environmental sustainability of logistics*. Kogan Page, 2012.
- MCKINNON, A., CULLINANE, S. e BROWNE, M.I. *Green logistics: improving the environmental sustainability of logistics*. V.1 Londres, Philadelphia, Nova Delhi, Kogan Page, 2010.
- MELLO, S. e BAPTISTA, P. “Evaluating the impacts of using cargo cycles on urban logistics: integrating traffic, environmental and operational boundaries.” *Eur. Transp. Res. Ver.*, v. 9 (30), p. 29-30, 2017.

- MIHAIU, D., OPREANA, A. e CRISTESCU, M.P. "Efficiency, Effectiveness and Performance of the Public Sector." *Rom. J. Econ. Forecast.* 13, 132–147, 2010.
- MIYABUKURO, S. B. *Estudo da análise de custo-efetividade no planejamento de políticas público-privadas de longo prazo integrada à análise de custo-benefício*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2014.
- MMA. *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013: Ano-base 2012*, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF, 2013.
- MMA. *Resolução CONAMA nº 272 de 2000 estabelece o limite máximo de ruído emitido por veículos de carga e passageiro em aceleração*, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF, 2000.
- MME. *Balanco energético nacional – ano base 2016*, Ministério de Minas e Energia, Brasília, DF, 2017.
- MOLES, R., FOLEY, W. e MORRISSEY, J. "Practical appraisal of sustainable development: Methodologies for sustainability measurement at settlement level." *Environmental Impact Assessment Review*, v. 28, 144–165, 2008.
- MONGEON, P. e PAUL-HUS, A. "The journal coverage of web of Science and Scopus: a comparative analysis." *Scientometrics*, v. 106, p. 213–228, 2016.
- MONTWILL, A. "The role of seaports as logistics centers in the modelling of the sustainable system for distribution of goods in urban areas." *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v.151, p. 257 – 265, 2014.
- MUÑOZ-VILLAMIZAR, A., MONTOYA-TORRES, J.R., VEGA-MEJIA, C. "Non-collaborative versus collaborative last-mile delivery in urban systems with stochastic demands." *Proc. CIRP* 30, 263–268, 2015.
- MUÑOZ-VILLAMIZAR, A., SANTOS,J., MONTOYA-TORRES, J., JACA, C. "Using OEE to evaluate the effectiveness of urban freight transportation systems: A case study". *International Journal of Production Economics*, 2018. DOI:10.1016/j.ijpe.2018.01.011.
- MUNUZURI, J., LARRANETA, J., ONIEVA, L.e CORTÉS, P. 'Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement.' *Cities*, 22, p. 15-28, 2005.
- MYERSON, P. Saving Green While Going Green, 2016. Disponível em : <https://www.inboundlogistics.com/cms/article/saving-green-while-going-green/>. Acesso em Setembro, 2018.
- NAVARRO, C.; ROCA-RIU, M.; FURIÓ, S.A e ESTRADA, M. 'Designing new models for energy efficiency in urban freight transport for smart cities and its application to the Spanish case.' *Transportation Research Procedia*, v. 12, p. 314 – 324, 2015.
- NEWMAN, P.e KENWORTHY, J. *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*. Island press, 1999.
- NICOLAS, J., POCHET P. e POIMBOEUF, H. 'Towards sustainable mobility indicators, application to the Lyons conurbation." *Transport Policy*, vol.10, p. 197–208, 2003.
- NIELSEN, L. *Classifications of Countries Based on Their Level of Development: How it is Done and How it Could be Done*. International Monetary Fund, 2011. Disponível em <http://www.relooney.fatcow.com/0_NS4053_1504.pdf>. Acesso em Novembro 2016.

- NTC. *Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços 2014*. NTC&Logística, Brasília, DF. Disponível em <http://www.portalcntc.org.br/media/images/publicacoes/manual-de-calculo-e-formacao-de-precos-rodoviario-2014/>. Acesso em Março 2017.
- Ogden, K.W. “Urban Goods Movement.” Ashgate Publishing, London, England, 1992.
- OLIVEIRA L.K.; OLIVEIRA, B.R. e CORREIA, V.A. ‘Simulation of an Urban Logistic Space for the Distribution of Goods in Belo Horizonte, Brazil”. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 125, p. 496 – 505, 2014.
- OLIVEIRA, C. e D’AGOSTO, M. *Application Handbook*. Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável, Rio de Janeiro, 2018.
- OLIVEIRA, C. e D’AGOSTO, M. *Reference Guide on Sustainability*. Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável, Rio de Janeiro, 2017.
- OLIVEIRA, C.M. *Procedimentos para identificação, análise e recomendação de boas práticas para o transporte de cargas*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.
- OLIVEIRA, C.M.; D’AGOSTO, M. A.; PREGER, M.F.; GONÇALVES, D.N.S.; GONÇALVES, F.S.; ASSUMPÇÃO, F. C. e MARUJO, L.G. *Evaluation of best practices introduction for the managerial improvement in the urban freight transport*, 2015.
- OLIVEIRA, L. K.; STUBBS, L. C. M.; GONTIJO, N. T.; OLIVEIRA, R. L. M. (2017). Proposição de modelos de geração de viagens para Belo Horizonte. *Transportes*, v. 25, n. 2, p. 137-155.
- OLIVEIRA, L., D’AGOSTO, M., FERNANDES, V.e OLIVEIRA, C. “A financial and environmental evaluation for the introduction of diesel-hydraulic hybrid-drive system in urban waste collection.” *Transportation Research D*, v. 31, p. 100-109, 2014.
- ONU. *Rio+20: o futuro que queremos*, 2012. Disponível em: <http://www.onu.org.br/rio20/cidades.pdf>. Acesso em 08 de Outubro de 2015.
- OSSES, U., ROJI, E., GURRUTXAGA, I.; LARRAURI, M. *A multidisciplinary sustainability index to assess transport in urban areas: a case study of Sonostia-San Sebastian, Spain*, v. 60, n. 11, p. 1891-1922, 2017.
- PDTU - *Plano Diretor de Transporte Urbano da Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. Secretaria de Estado de Transporte. Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2014.
- QUACK, H. “Improving urban freight transport sustainability by carriers - Best practices from The Netherlands and the EU project CityLog.” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 39, 158-171, 2012.
- Quak, H. ‘Sustainability of urban freight transport: Retail distribution and local regulations in cities”. No. EPS-2008-124-LIS, 2008.
- RAI, H., LIER, T., MEERS, D.e MACHARIS, C. “Improving urban freight transport sustainability: Policy assessment framework and case study.” *Research in Transportation Economics*, v. 64, p. 26-35, 2017.
- RAJAK, S., PARTHIBAN, R. e DHANALAKSHMI, R. “Sustainable transportation systems performance evaluation using fuzzy logic.” *Ecological Indicators*, v. 71, pp. 503-513, 2016.
- REISEI, M., AYE, L. RAJABIFARD, A. e NGO, T. “Transport sustainability index: Melbourne case study.” *Ecological Indicators*, v.43, pp. 288-296, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.031>

- REVZANI, Z., JANSSON, J. e BONDIN, J. “Advances in consumer electric vehicle adoption research: A review and research agenda. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.” v.32, p. 122-136, 2016. doi: <http://dx.doi.org.ez29.capes.proxy.ufrj.br/10.1016/j.trd.2014.10.010>.
- RIBEIRO, S. L. F. *Análise de Alternativas para Implantação de Porto Concentrador de Movimentação de Contêineres utilizando Metodologia Multicriterial*. Dissertação de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.
- RIZET, C.; CRUZB, C. e VROMANTC, M. “The Constraints of Vehicle Range and Congestion for the Use of Electric Vehicles for Urban Freight in France.” *Transportation Research Procedia*, volume 12, p. 500 – 507, 2015.
- ROSS, T. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. John Wiley & Sons, London, 2004.
- ROUMBOUTSOS, A, KAPROS S. e VANELSLANDER, T. “Green city logistics: Systems of Innovation to assess the potential of E-vehicles.” *Research in Transportation Business & Management*, v.11, 43–52, 2014.
- ROWLEY, J. e SLACK, F. “Conducting a literature review”, *Management Research News* v.27, n.6, pp. 31-39, 2004. doi:10.1108/01409170410784185
- RUSSO, F. e COMI, A. “Urban Freight Transport Planning towards Green Goals: Synthetic Environmental Evidence from Tested Results”. *Sustainability*, 8, 381, 2016; doi:10.3390/su8040381
- SAATY, T. L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York, London: Editora McGraw Hill, 1980. 287p.
- SAATY, T.L. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with AHP*. RWS Publications, Pittsburg, 2000.
- SAATY, T. L.; VARGAS, L. The possibility of group welfare functions. *International Journal of Information Technology & Decision Making* 2005;4:67-76, 2005 [Also in more mathematical version: The possibility of group choice: pairwise comparisons and merging functions . Working Paper, University of Pittsburgh. Pittsburgh, PA, 15260; 2005]
- SADHU, S.L.N.S., TIWARI, G. e JAIN, H. “Impact of cycle rickshaw trolley (CRT) as non-motorised freight transport in Delhi.” *Transp. Policy* 35, 64–70, 2014.
- SALOMON, V. P., MONTEVECHI J. A. P. e PAMPLONA E. O. *Justificativas para Aplicação do Método de Análise Hierárquica*, 19º ENEGEP, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.
- SANTOS, A. e RIBEIRO, S. “The use of sustainability indicators in urban passenger transport during the decision-making process : the case of Rio de Janeiro, Brazil.” *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 5, pp 251-260, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2013.04.010>
- SARMA, S.L.N.; TIWARI, G. e JAIN, H. “Impact of cycle rickshaw trolley (CRT) as non-motorised freight transport in Delhi.” *Transport Policy*, volume 35, p.64–70, 2014.
- SAVELSON, A. e COLMAN, R, *Sustainable transportation in Halifax regional Municipality measuring sustainable development, GPI, Genuine Progress Index*, for Atlantic Canada, 2008.
- SCHAU, V., ROSSAK, W., HEMPEL, H. e SPATHE, S. *Smart City Logistik Erfurt (SCL): ICT-support for managing fully electric vehicles in the domain of inner city freight traffic: A Look at an ongoing federal*

- project in the City of Erfurt, Germany. IEOM 2015 - 5th Int. Conf. Ind. Eng. Oper. Manag. Proceeding, 2015.
- SCHIER, M., OFFERMANN, B., WEIGL, J.D., MAAG, T., MAYER, B., RUDOLPH, C. e GRUBER, J. *Innovative two wheeler technologies for future mobility concepts*. 2016 11th Int. Conf. Ecol. Veh. Renew. Energies, EVER 2016.
- SCHLIWA, G; ARMITAGE, R. AZIZ, S., EVANS, J. e RHOADES, J. “Sustainable city logistics — Making cargo cycles viable for urban freight transport.” *Research in Transportation Business & Management*, volume 15, p. 50–57, 2015.
- SCHOEMAKER, J., ALLEN, J., HUSCHEBECK M. e MONIGL, J. *Quantification of Urban Freight Transport Effects I*. Best Urban Freight Solutions II, 2006.
- SCVRTTCGP. *Circular Informativa nº 001/Agosto 2016. Sindicato dos Condutores de Veículos Rodoviários e Trabalhadores em Transporte de Carga em Geral e Passageiros no Município do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro-RJ, 2016. Available at: <http://www.rodoviariorio.com.br/circular-cct-carga-2016.htm>. Accessed in November 2016.
- SEURING, S. e GOLD, S. “Conducting content-analysis based literature reviews in supply chain management.” *Supply Chain Management: An International Journal*, 7(5), pp.544-555, 2012.
- SHAW, I. S. e SIMÕES M. G. *Controle e Modelagem Fuzzy*. 1ª ed. São Paulo: FAPESP, Editora Edgard Blücher Ltda, 165p, 1999.
- SHEPARD, B. B. “Quantifying environmental impact assessments using fuzzy logic”, *Springer Series on Environmental Management*, USA: Springer, 264p, 2005.
- SHIAU, T. e LIU, J. “Developing an indicator system for local governments to evaluate transport sustainability strategies.” *Ecological Indicators*, v. 34,p. 361-371, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.06.001>
- SICHE, R. et al. Índices Versus indicadores.: Precisões Conceituais na Discussão da Sustentabilidade de Países. *Ambiente & Sociedade*, Campinas, v. 10, n. 2, p.137-148, dez. 2007. Semestral. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/asoc/v10n2/a09v10n2.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2015
- SILVA, M. A. B. *Sistema de classificação fuzzy para áreas contaminadas*. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- SILVA, V. L. e MAIA, A. D. G. “Uma Contribuição ao Gerenciamento da Mobilidade: Modelo Integral-Fuzzy para Avaliação de Intervenções em Vias Urbanas.”, X SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção, UNESP, São Paulo, SP, Brasil, 2004.
- SIMOS, J. *Evaluer l’impact sur l’environnement, une approche originale par l’analyse multicritère et la négociation*. PPUR, Lausanne, Suisse, 1990.
- SIMS R., R. SCHAEFFER, F. CREUTZIG, X. CRUZ-NÚÑEZ, M. D’AGOSTO, D. DIMITRIU, M.J. FIGUEROA MEZA, L. FULTON, S. KOBAYASHI, O. LAH, A. MCKINNON, P. NEWMAN, M. OUYANG, J.J. SCHAUER, D. SPERLING, AND G. TIWARI, 2014: *Transport*. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [EDENHOFER, O., R. PICHES-MADRUGA, Y. SOKONA, E. FARAHANI, S. KADNER, K. SEYBOTH, A. ADLER, I. BAUM, S. BRUNNER, P. EICKEMEIER, B. KRIEMANN, J. SAVOLAINEN, S. SCHLÖMER, C. VON STECHOW, T.

- ZWICKEL AND J.C. MINX (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- SIMS, R., SCHAEFFER, R., CREUTZIG, F. *et al*, *Transport*. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.
- Smart Freight Centre. “Developing a Sustainable Urban Freight Plan – a review of good practices”. Smart Freight Centre, Amsterdam, 2017.
- SOUZA, H. H. H. *Avaliação do Desempenho de Sistemas de Transporte Público Urbano sob a ótica da eficácia. Dissertação* (Mestrado em Engenharia de Transporte), Instituto Militar de Engenharia - IME, Rio de Janeiro, 2001.
- TANGUAY, A., LEFEBVRE, J.F. e LANOIE, P. “Measuring the sustainability of cities: an analysis of the use of local indicators.” *Ecological Indicators* 10, 407–418, 2010.
- TANIGUCHI, E., THOMPSON, R.G. e YAMADA, T. “New Opportunities and Challenges for City Logistics.” *Transp. Res. Procedia*, v. 12, 5–13, 2016.
- TAO, C.C. e HUNG, C.C. “A comparative approach of the quantitative models for sustainable transportation.” *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v. 5, 3329–344, 2013. Disponível em <<http://www.easts.info/2003journal/papers/3329.pdf>>. Acesso em Novembro 2016.
- TAUBENBÖCK, H., ESCH, T., FELBIER, A. *et al* “Monitoring urbanization in mega cities from space”, *Remote Sensing of Environment*, v.117, n.1, pp.162-176, 2012.
- THOMÉ, A.M., SCAVARDA, L. F. e SCAVARDA, A.J. “Conducting systematic literature review in operations management.” *Production Planning & Control*, 2016. DOI: 10.1080/09537287.2015.1129464.
- THOMPSON, R.G. e HASSALL, K. “Implementing High Productivity Freight Vehicles in Urban Areas.” *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 151, 318–332, 2014.
- TORRACO, R. “Writing integrative literature reviews: Guidelines and examples”, *Human Resource Development Review*, Vol.4, No.3, pp.356-367, 2005.
- TOZZI, M.; CORAZZA, M.V. e MUSSO, A. “Recurring patterns of commercial vehicles movements in urban areas: the Parma case study.” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, volume 87, p. 306 – 320 2013.
- U.S. CENSUS BUREAU. *2010 Census urban and rural classification and urban area criteria*, 2013. Disponível em: <https://www.census.gov/geo/reference/ua/urban-rural-2010.html>. Acesso em: 28 set. 2017.
- VISSER, J; NEMOTO, J. e BROWNE, M. “Home Delivery and the Impacts on Urban Freight Transport: A Review.” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, volume 125, p. 15 – 27, 2014.
- VON ALTROCK, C. *Fuzzy Logic and Neurofuzzy Applications Explained*. New Jersey, Prentice Hall, 1995.
- VON ALTROCK, C. e KRAUSE, B. “Multi-Criteria Decision Making in German Automotive Industry Using Fuzzy Logic”, *Fuzzy Sets And Systems*, v. 63, p. 375-380, 1994.
- WEISS, M., DEKKER, P., MORO, A., SCHOLZ, H. e PATEL, M. “On the electrification of road transportation – A review of the environmental, economic, and social performance of electric two-wheelers.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. v. 41, p. 348-366, 2015.

- WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Healthy transports in developing cities*, 2017. Disponível em: http://www.who.int/gho/urban_health/situation_trends/urban_population_growth/en/. Acesso em 21 set 2017.
- WOOD, C. *Environmental impact assessment: A comparative review* (2nd ed., Vol. 405). UK: Prentice-Hall, 2002.
- ZADEH, L. A. "The Role of Fuzzy Logic in The management of Uncertainty in Expert Systems", *Fuzzy Sets and Systems*, v.11, pp.199-227, 1983.
- ZEGRAS, C. *Sustainable Transport Indicators and Assessment Methodologies* Biannual Conference and Exhibit of the Clean Air Initiative for Latin American Cities , July, Sao Paulo, Brazil, 2006.
- ZITO, P. e SALVO, G. "Toward an urban transport sustainability index: an European comparison." *Eur. Transport Res. Rev.* 3, p. 1–17, 2011.

APÊNDICE 1

Questionário para Geração dos Conjuntos Fuzzy em Entrevista com Especialistas

Prezado Sr. (a)

Este questionário tem fins **puramente acadêmicos** e tem por objetivo **introduzir o conhecimento de especialistas** para o desenvolvimento de uma metodologia de **avaliação da sustentabilidade de operações de transporte de carga urbano**. A metodologia proposta utiliza conceitos da Lógica Fuzzy para o tratamento de incertezas e da subjetividade que normalmente permeiam alguns aspectos da avaliação do grau de sustentabilidade de uma operação de transporte. Esta subjetividade pode ser mais coerentemente trabalhada utilizando-se termos linguísticos que traduzem de maneira mais intuitiva o conhecimento humano.

A **primeira parte do questionário** visa à identificação do especialista e o conhecimento de sua área de atuação e de sua experiência.

A **segunda parte do questionário** tem por objetivo obter uma avaliação qualitativa de parâmetros que podem ser medidos ou estimados por valores. Esta avaliação qualitativa é realizada utilizando expressões ou termos linguísticos. Aproveitando a experiência e o conhecimento do especialista, solicita-se sua contribuição para avaliar por expressões ou termos linguísticos (tais como BAIXO, MÉDIO, ALTO) os intervalos de valores para determinados parâmetros ou variáveis quantitativas da metodologia proposta. A avaliação qualitativa destes parâmetros permite que os mesmos sejam agregados por meio de um sistema ou base de regras correspondente a inferência *fuzzy*. A maioria dos valores sugeridos para os limites foi baseada em recomendações e observações de manuais e estudos. O **especialista pode sugerir e alterar os valores limites fornecidos e realizar considerações e observações** que julgar necessário em cada parâmetro analisado.

Agradeço desde já a atenção e a sua colaboração para o desenvolvimento desta metodologia.

Renata Albergaria de Mello Bandeira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ

1ª Parte do Questionário - Informações sobre o Especialista

- 1) Nome : _____
2) Empresa/Instituição em que atua: _____ I _____
3) Formação Acadêmica/Titulação:
Graduação: _____
Pós-Graduação _____
3) Área de Atuação: _____

4) Tempo de Atuação na Área: _____

2ª Parte do Questionário – Avaliação dos Indicadores

1.Indicador: Emissão de poluentes atmosféricos (COV,CO, NO _x , MP)		
<p>No setor de transporte, os poluentes atmosféricos mais comuns que atuam localmente e, consequentemente, têm maior impacto em áreas urbanas, são o CO, NO_x, COV e MP (D'Agosto, 2015). Segundo o Relatório da Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro – ano base 2014 (INEA, 2015), o CO, NO_x e partículas totais em suspensão não ultrapassaram os padrões de qualidade do ar, estando 100% na faixa considerada como boa. Apenas o material particulado (MP) apresentou percentual de ocorrência na faixa classificada como inadequada ou má. Desta forma, optou-se por considerar a emissão de MP como comparativo para emissão de poluentes atmosféricos, por ser o mais crítico na cidade do Rio de Janeiro, onde a pesquisa é realizada. Para estabelecer os limites de emissão, foram adotados os valores dos intervalos de fatores de emissão nacionais de poluentes atmosféricos e de gases de efeito estufa por tipo de veículo apresentados no 2º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013, elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2014). O veículo com maiores emissões de MP é o ônibus urbano, com uma faixa de 0,014 a 1,072 g/Km de emissão de MP, enquanto o melhor cenário ocorreria caso a distribuição fosse toda realizada a pé ou por bicicletas.</p>		
Em sua opinião, quais os valores limites, em g/Km, que melhor traduzem os termos linguísticos abaixo para a emissão de poluentes atmosféricos (no caso, apenas MP)? Considere para a sua resposta o intervalo de 0 a 1,072*.		
Termo Linguístico	Limite Inferior (g/km)	Limite Superior (g/km)
Emissão BAIXA	0	
Emissão MÉDIA		
Emissão ALTA		1,072

* Como forma de auxiliar a resposta, favor considerar a Tabela 1 que apresenta o intervalo de fatores de emissão de MP_{comb}, segundo o 2º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013, elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2014)

Tabela 1. Intervalo de fatores de emissão de escapamento por tipo de veículo

Veículo	MPcomb (g/km)
Motocicleta	0,0035-0,0287
Automóvel	0,0011-0,024
Veículo comercial leve diesel	0,032 -0,262
Veículo comercial leve gasolina	0,0011
Caminhões semi-leves	0,003-0,271
Caminhões leves	0,007-0,444
Caminhões médios	0,007-0,444
Caminhões semi-pesados	0,016-0,715
Caminhões pesados	0,014-0,715
Ônibus urbano	0,014-1,072

FONTE: MMA (2014)

2. Indicador: Emissão de ruído

Ruídos associados à operação dos transportes podem afetar a saúde humana, provocando irritabilidade, abalo do sistema nervoso, incômodo e até mesmo desconforto físico (D'AGOSTO, 2015). A Resolução CONAMA nº 272 de 2000 estabelece o limite máximo de ruído emitido por veículos de carga e de passageiro em aceleração, conforme NBR 8433. Para veículos de carga, o nível de ruído máximo varia **de 77 dBA a 80 dBA**, de acordo com o tipo de ignição e potência máxima do motor. Para motocicletas, triciclos, ciclomotores e bicicletas com motor auxiliar, veículos comumente adotados em operações de distribuição em áreas urbanas, a Resolução Conama nº 2 estabelece que os limites máximos de ruído emitidos variam de **75 a 80 dBA**, de acordo com a categoria do veículo (D'AGOSTO, 2015). Por sua vez, a Resolução nº 418 do CONAMA de 2009 estabelece os limites máximo de ruído emitidos por veículos automotores na condição de parado para veículos em uso, sendo que estes valores variam de **92 a 103 dBA**. Ruídos gerados por atividades de carga e descarga, devido ao uso de equipamentos, ato de abrir e fechar o caminhão, costumam variar **entre 53 e 85 dBA** a uma distância de 7,5m (BESTUFS, 2006). Assim, adotou-se como limite superior o valor de 103 dBA e o limite inferior de 0 dBA, no caso de entregas por bicicletas. Porém, ainda é interessante destacar que os limites acústicos da Prefeitura do Rio de Janeiro, estabelecidos pela lei nº 3.268, de 29 de agosto de 2001, estão divididos em quatro categorias, de acordo com o zoneamento do uso do solo: até 45 dBA para o período diurno, nas zonas de preservação e conservação de zonas agrícolas; **até 55 dBA** (período diurno), na zonas residenciais urbanas; até **65 dBA** (período diurno, para zonas de negócios, comércio e administração; e até **70 dBA** (período diurno, nas zonas predominantemente industriais. Para o período noturno, estes limites são reduzidos de 5 dBA.

Em sua opinião, quais os valores limites, em dBA, que melhor traduzem os termos linguísticos abaixo para a emissão de ruído pelo transporte urbano de cargas? Considere para a sua resposta o intervalo de 0 a 103*.

Termo Linguístico	Limite Inferior (dBA)	Limite Superior (dBA)
Emissão BAIXA	0	
Emissão MÉDIA		
Emissão ALTA		103

* Como forma de auxiliar a resposta, favor considerar as Tabela 2 e 3, que apresentam os limites máximos de ruído para cada tipo de veículo/atividade ligadas a distribuição em áreas urbanas e os limites acústicos da Prefeitura do Rio de Janeiro de acordo com o zoneamento do uso do solo.

Tabela 2. Limites máximos de ruído

Tipo de Veículo	Limites máximos de ruído (dBA)	Fonte
Veículos de carga (VUC a caminhões pesados)	77-80	Resolução Conama nº 272 de 2000
Motocicletas, triciclos, ciclomotores e bicicletas com motor auxiliar	75-80	Resolução Conama nº 2
Veículos automotores na condição de parado para veículos em uso	92-103	Resolução nº 418 do CONAMA de 2009
Atividades de carga e descarga (uso de equipamentos, ato de abrir e fechar o caminhão, etc)	53-85	BESTUFS (2006)

Tabela 3. Limites acústicos do município do Rio de Janeiro

Zoneamento	Limites máximos de ruído (dBA)	
	Período noturno	Período diurno
Zonas de preservação e conservação de zonas agrícolas	40	45
Zonas residenciais urbanas	50	55
Zonas de negócios, comércio e administração	60	65
Zonas predominantemente industriais	65	70

3. Indicador: Emissão de CO ₂		
<p>O setor de transporte foi o segundo maior emissor de CO₂, em 2008, respondendo por 23% das emissões mundiais (D'AGOSTO, 2015). Em particular, o transporte de carga é responsável por 13,8% das emissões de GEE no mundo, e 13% no Brasil (BRASIL, 2016; SIMS et al., 2014). O TUC, devido a viagens curtas de baixa velocidade e às frequentes paradas, necessárias para a distribuição urbana, apresenta altas taxas de emissão de CO₂. O 2º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 apresenta a quilometragem por litro por combustíveis para os diferentes veículos (Tabela 4) e o fator de emissão de CO₂ por tipo de combustível (Tabela 5) (MMA, 2014). Porém, dado que a gasolina C é composta por 27 % de etanol anidro e 73% de gasolina A e o óleo diesel tem 10% de biodiesel e 90% de diesel mineral, foi calculado os fatores de emissão de CO₂ para a gasolina C e óleo diesel (Tabela 5). Com base nestes dados, foi estimada então a emissão de CO₂ para cada tipo de veículo (em kg/km), conforme apresentado na Tabela 6. O limite inferior adotado é de zero, para o caso de entregas feitas a pé, e o limite máximo é de 1,124 kg/km, para o ônibus urbano.</p> <p>Em sua opinião, quais os valores limites, em kg/km, que melhor traduzem os termos linguísticos abaixo para a emissão de CO₂ por km (em kg/ km)? Considere para a sua resposta o intervalo de 0 a 0,426*.</p>		
Termo Linguístico	Limite Inferior (tep/1000km)	Limite Superior (tep/1000km)
Consumo BAIXO	0	
Consumo MÉDIO		
Consumo ALTO		1,124

* Como forma de auxiliar a resposta, favor considerar a Tabela 6 que apresenta o fator de emissão de CO₂ em kg/ km por diferentes tipos de veículo e combustível.

Tabela 4. Rendimento de veículos

Categoria	km/l
Motocicleta (gasolina)	37.28
Automóveis (gasolina)	11.2
Veículo Comercial Leve (diesel)	10
Caminhões semi-leves	9.1
Caminhões leves	5.6
Caminhões médios	5.6
Caminhões semi-pesados	3.4
Caminhões pesados	3.4
Ônibus urbano	2.3

Fonte: MMA (2014)

Tabela 5. Fator de emissão de CO₂ (kg/l) por tipo de combustível

Combustível	Fator de emissão de CO ₂ (kg/l) ¹
Gasolina Automotiva	2,212
Etanol Hidratado	1,457
Etanol Anidro	1,526
Diesel Mineral	2,603
Biodiesel	2,431
GNV (kg/m ³)	1,999
Gasolina C ²	2,02678
Óleo diesel ³	2,5858

¹Considerando apenas veículos adquiridos a partir de 2000.

²Considerando que a Gasolina C é composta por 27% de etanol anidro e 73% de gasolina A.

³Considerando que o óleo diesel é composto por 90% de diesel mineral e 10% de biodiesel

Fonte: (MMA, 2014)

Tabela 6. Fator de emissão de CO₂ (kg/km) por tipo de veículo e combustível

Categoria	Emissão de CO ₂ (Kg/km)
Motocicleta (gasolina)	0,054366416
Automóveis (gasolina)	0,1809625
Veículo Comercial Leve (diesel)	0,25858
Caminhões semi-leves	0,284153846
Caminhões leves	0,46175
Caminhões médios	0,46175
Caminhões semi-pesados	0,760529412
Caminhões pesados	0,760529412
Ônibus urbano	1,12426087

Fonte: MMA (2014)

4. Indicador: Taxa de ocupação do veículo

A taxa de ocupação do veículo é um indicador da eficiência de uma operação de transporte de carga. Contudo, segundo Dablanc (2009), o transporte de carga urbana tende a ser ineficiente, com baixas taxas de ocupação, na maioria das cidades, incluindo aquelas de países desenvolvidos. Porém, a taxa de ocupação do veículo, expressa em volume, em cidades europeias está aumentando, chegando até a 80% (BESTUFS, 2006). **Copenhagen**, que é uma cidade apontada como exemplo em termos de planejamento urbano relacionado a mudanças climáticas e poluição, sendo vencedora do Prêmio Capital Verde Europeia (Pacheco, 2014), apresentava, em 2006, números relativos à taxa de ocupação para o transporte urbano de carga entre **65%** e **85%** (BESTUFS, 2006). Entre 2002 e 2003, chegou a ser implantada uma restrição denominada City Goods Ordinance, na qual apenas veículos de até 2,5t, com menos de 8 anos e com taxa superior a 60% poderiam circular no centro histórico e medieval de Copenhagen. **Parma**, na Itália, que também é uma cidade histórica, também implantou em 2004 uma iniciativa denominada ECOLOGISTICS/ECOCITY, no qual os transportadores devem satisfazer uma série de exigências para ter permissão de acesso ao centro histórico com veículo de até 3,5t. Entre estas exigências, destaca-se uma taxa de ocupação de, no mínimo, **70%**, em peso ou volume (DG MOVE, 2005). Em **Gotherburg**, este limite é de **65%** (Teo et al., 2014). Em Londres, cidade com altas taxas de poluição, a taxa média de ocupação de veículos para transporte de carga varia entre **40 e 60%** (BESTUFS, 2006). No entanto, o transporte para Londres também relata um fator de carga médio para vans em Londres de aproximadamente **38%** (ALICE / ERTRAC Urban Mobility WG, 2015).

Em sua opinião, quais os valores limites que melhor traduzem os termos linguísticos abaixo para a taxa de ocupação de veículos para o transporte de carga urbana (%)? Considere para a sua resposta o intervalo de 0 a 100%

Termo Linguístico	Limite Inferior (%)	Limite Superior (%)
Ocupação BAIXA	0	
Ocupação MÉDIA		
Ocupação ALTA		100

5. Indicador: Custo de transporte por km

O transporte urbano de cargas representa uma parte pequena do total da distância percorrida para o transporte de mercadorias desde a fonte de produção até o consumidor, porém é responsável por cerca de 28% dos custos totais de transporte (Bestufs, 2006). Nos centros urbanos brasileiros, entregas por bicicleta são, em média, 30% mais baratas que entregas por motofrete (Terra, 2015). Foram realizadas cotações para motofrete, tendo sido obtido os seguintes valores médios: (i) custo mínimo de R\$ 7,50 por pedido mais um custo de R\$1,80 por km. Assim, considerando uma distância de 10km, o custo por km da entrega por motofrete seria de R\$2,55 (US\$ 0,75/km) e por bicicleta seria R\$1,78 (US\$ 0,52/km). As demais cotações indicaram os seguintes fretes: (i) R\$ 3,06/km (US\$0,90) por automóvel por carga completa; (ii) R\$ 4,1/km (US\$1,21) por automóvel por carga fracionada; (iii) R\$ 3,87/km (US\$ 1,14) por picape por carga completa; (iv) R\$ 5,44/km (US\$ 1,60) por picape por carga fracionada; (v) R\$ 3,23/Km (US\$ 0,95/km) por furgão por carga completa; (vi) R\$ 4,39/Km (US\$ 1,29/km) por furgão por carga fracionada; (vii) R\$ 3,57/km (US\$ 1,05) por caminhão semi-leve por carga completa; (viii) R\$ 4,90/km (US\$ 1,44) por caminhão semi-leve por carga fracionada; (ix) R\$ 3,75/km (US\$ 1,10) por caminhão leve por carga completa; (x) R\$ 5,18/km (US\$ 1,53) por caminhão leve por carga fracionada; (xi) R\$ 4,04/km (US\$ 1,19) por caminhão médio por carga completa; (xii) R\$ 5,58/km (US\$ 1,64) por caminhão médio por carga fracionada (valores cotados em 14 de dezembro de 2016).

Em sua opinião, quais os valores limites que melhor traduzem os termos linguísticos abaixo para o custo de transporte urbano de carga por km (em dólares por quilometro)*?

Termo Linguístico	Limite Inferior (US\$/km)	Limite Superior (US\$/km)
CUSTO BAIXO	0,05	
CUSTO MÉDIO		
CUSTO ALTO		1,70

* Como forma de auxiliar a resposta, favor considerar a Tabela 7 que apresenta valores de frete por km para diferentes tipos de veículo, cotados para a cidade do Rio de Janeiro.

Tabela 7. Custo de transporte por km

Categoria	Custo/km (US\$/km)	
	Carga fracionada	Carga completa (lotação)
Bicicleta	0,52	-
Motocicleta	0,75	-
Automóveis	1,21	0,90
Picape	1,60	1,14
Veículo Comercial Leve	1,29	0,95
Caminhões semi-leves	1,44	1,05
Caminhões leves	1,53	1,10
Caminhões médios	1,64	1,19

6. Indicador: Velocidade média operacional

Em geral, o transporte urbano de cargas é caracterizado por rotas relativamente curtas e com diversas paradas devido ao número de entregas a serem realizadas, além de uma velocidade média operacional baixa devido aos congestionamentos de tráfego. Tais características tornam o transporte urbano propenso a ineficiências, aumentando assim o custo logístico. Como limite inferior para a velocidade média operacional da operação será adotado a velocidade de 4km/h, considerada como uma velocidade para entregas realizadas a pé. Como referência para velocidade máxima para o caso de uma operação de transporte urbano de cargas na cidade do Rio de Janeiro, será adotado o valor de 80 km/h, que é a velocidade máxima permitida pelo Código Brasileiro de Trânsito, que classifica as vias urbanas e determina a velocidade máxima para cada tipo de via, conforme apresentado na Tabela 8. De fato, no Rio de Janeiro, a velocidade máxima permitida em algumas vias urbanas é de 80 km/h¹. Porém, segundo dados da CET/RIO, a velocidade média nos horários de pico nas principais vias da cidade chega a 15 km/h². A Tabela 9 apresenta a velocidade média de algumas das principais vias da cidade do Rio de Janeiro, segundo dados levantados pela CET/RIO, sendo que estes variam de 11 a 48,8 km/h.

Em sua opinião, quais os valores limites que melhor traduzem os termos linguísticos abaixo para a velocidade média operacional para o transporte de carga urbana (km/h)? Considere para a sua resposta o intervalo de 4 a 80 km/h

Termo Linguístico	Limite Inferior (km/h)	Limite Superior (km/h)
Velocidade BAIXA	4	
Velocidade MÉDIA		
Velocidade ALTA		80

¹Velocidade permitida pelo CBT para vias arteriais em áreas urbanas

²<http://vejario.abril.com.br/materia/cidade/transito-rio-de-janeiro-engarrafamento>

Tabela 8. Velocidade máxima por tipo de via segundo o CBT

Tipo de via urbana	Características	Velocidade Máxima (km/h)
De trânsito rápido	Acessos especiais com trânsito livre, sem interseções em nível, sem acessibilidade direta aos lotes lindeiros e sem travessia de pedestres em nível	80
Arterial	Interseções em nível, geralmente controladas por semáforo, com acessibilidade aos lotes lindeiros e às vias secundárias e locais, possibilitando o trânsito entre as regiões da cidade.	70
Coletora	Coleta e distribui o trânsito que tenha necessidade de entrar ou sair das vias de trânsito rápido ou arteriais, possibilitando o trânsito dentro das regiões da cidade.	40
Local	Interseções em nível não semaforizadas, destinadas apenas ao acesso local ou a áreas restritas.	30

Tabela 9. Velocidade média por vias no Rio de Janeiro

Via	Velocidade média (km/h)
Avenida Brasil (trecho entre Penha e Av. Francisco Bicalho)	48,8
Auto-estrada Lagoa-Barra	42,7
Túnel Rebouças	32,1
Avenida Borges de Medeiros	16,7
Avenida Vermelha	17,6
Túnel Santa Bárbara	38,4
Rua 1º de março	11,1
Viaduto do Gasômetro	21,7

Fonte: CET/RIO (<http://vejario.abril.com.br/materia/cidade/transito-rio-de-janeiro-engarrafamento>)

7. Indicador: Renda Gerada por km

Apesar dos impactos negativos para o meio ambiente, congestionamento do trânsito e para o bem-estar da população, o transporte urbano de cargas (TUC) é um importante facilitador para o crescimento econômico, gerando impactos positivos, como permitir o acesso a diferentes bens, a geração de empregos e de renda. O índice de renda gerada por km é dado pela razão entre a renda gerada por km pela a operação em análise e a renda média gerada por quilômetro percorrido pelo TUC na cidade do Rio de Janeiro. Adotou-se o valor de US\$0,90/km para a renda média gerada por km para a cidade do Rio de Janeiro¹. Considera-se como limite superior o valor de 2, ou seja, o caso de a operação gerar uma renda por km que seja o dobro da média da cidade em análise.

Em sua opinião, quais os valores limites que melhor traduzem os termos linguísticos abaixo para a razão entre renda gerada por km percorrido para a operação de transporte urbano de carga em análise e a renda média gerada por km percorrido pelo TUC na cidade do Rio de Janeiro?

Termo Linguístico	Limite Inferior (%)	Limite Superior (%)
Renda BAIXA	1	
Renda MÉDIA		
Renda ALTA		2

¹ Como referência para o indicador renda gerada por km percorrido, para o caso de uma operação de transporte urbano de cargas na cidade do Rio de Janeiro, considera-se o piso salarial de R\$ 1.396,23 para motorista de caminhão para o ano de 2016, estabelecido pelo Sindicato de Condutores de Veículos Rodoviários e Trabalhadores de Cargas em Geral e Passageiros no Município do Rio de Janeiro (<http://www.rodoviariorio.com.br/circular-cct-carga-2016.htm>). A população economicamente ativa (PEA) do Brasil em 2013 era de 156, 6 milhões de habitantes e, de acordo com dados do PAS/2013, o número de pessoas ocupadas nas atividades de transporte rodoviário de cargas e de correios e outras atividades de distribuição é de 1.151.882 habitantes (IBGE, 2004), de modo que aproximadamente 0,73% da PEA do país trabalha nestas atividades de transporte. Como a PEA do município do Rio de Janeiro é de 3.083.000 habitantes (IBGE, 2016), estima-se que 22.505 pessoas ocupadas se destinem a atividade de transporte rodoviário de cargas na cidade, o que multiplicado pelo piso salarial do motorista indicaria uma renda total de R\$ 32.423.412,80 por mês gerada por esta atividade. Ainda, de acordo com dados do PDTU (2014), o total de veículos/dia para deslocamentos

interno-externo e externo-interno no município do Rio de Janeiro equivale a 16.647 viagens/dia. Considerando um total de 26 dias úteis/mês e que os deslocamentos ocorressem apenas em dias úteis, pode-se estimar um valor de R\$74,91 (US\$ 22,03) de renda gerada por viagem. Não há levantamentos sobre a distância média percorrida por rotas para distribuição de carga urbana na cidade do Rio de Janeiro. Porém, Jaller et al. (2016) mensuraram uma distância média de 48,1km por rota diária para TUC na região metropolitana da cidade do México, cuja área é de 1485 km². Dado que a área da região metropolitana do Rio de Janeiro é de 1255km² e que ambas são megacidades de países em desenvolvimento, adotou-se este valor como a distância média por viagem por TUC para a cidade do Rio de Janeiro, obtendo-se assim o valor de R\$ 1,56 de renda gerada por km percorrido pelo TUC (US\$0,46/km). Aplicando 96% dos impostos sobre salários no Brasil, obtém-se uma receita total de US\$ 0,90/km.

APÊNDICE 2

Processo de Inferência

O processo de inferência relaciona as variáveis entre si por meio de uma base de regras formada por estruturas do tipo SE –ENTÃO. As Tabelas 7.1 a 7.3 apresentam as base de regras, desenvolvidas com base na percepção dos especialistas para os quatro blocos de inferência apresentados na arquitetura da rede *fuzzy* (Figura 5.4 do capítulo 5). Destaca-se que para o bloco BI3, referente ao índice de desempenho ambiental, foi mantido apenas um indicador (renda gerada por km) para o caso analisado, de modo que não é necessária a construção de uma base de regras.

.

Tabela 1: Base de regras do Índice de Desempenho Ambiental

Regra	Antecedentes								Consequência					FC			
1	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	ALTO	1
2	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
3	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
4	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
5	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
6	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO	1
7	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
8	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO	1
9	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	BAIXA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
10	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
11	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
12	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO	1
13	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
14	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO	1
15	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
16	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO	1
17	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
18	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	MÉDIA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
19	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO ALTO	1
20	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO	1
21	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	BAIXO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
22	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO	1
23	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
24	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	MÉDIO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
25	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	BAIXO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
26	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	MÉDIO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	MÉDIO BAIXO	1
27	SE	Emissão de poluentes atmosféricos	é	ALTA	E	Nível de ruído	é	ALTO	E	Emissão de CO ₂	é	ALTO	ENTÃO	índice de desempenho ambiental	é	BAIXO	1

Tabela 2. Base de regras para o Índice de Desempenho Econômico

Regra	Antecedentes									Consequência				FC			
1	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
2	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
3	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
4	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
5	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
6	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO	1
7	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	BAIXO	1
8	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
9	SE	taxa de ocupação	é	BAIXA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
10	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO	1
11	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
12	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
13	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
14	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO	1
15	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
16	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
17	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
18	SE	taxa de ocupação	é	MÉDIA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO	1
19	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
20	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
21	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	BAIXA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	ALTO	1
22	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO	1
23	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
24	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	MÉDIA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1
25	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	BAIXA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO BAIXO	1
26	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	MÉDIA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO	1
27	SE	taxa de ocupação	é	ALTA	E	custo total de transporte	é	ALTA	E	velocidade média operacional	é	ALTA	ENTÃO	índice de desempenho econômico	é	MÉDIO ALTO	1

Tabela 3: Base de regras do Índice de Sustentabilidade do Transporte Urbano de Carga

[illegible]

A seguir, apresenta-se a computação da inferência de cada regra por meio do método de Mamdani para os três casos analisados.

Operação DTE

- **Índice de Desempenho Ambiental:**

. No caso do BI-1, para a DTE, tem-se para a regra SE:

- Regra 1: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;1\}$
ALTO = 1,0
- Regra 2: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 3: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 4: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;1\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 5: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 6: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 7: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;1\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 8: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 9: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 10: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;1\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 11: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0; 1;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 12: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0; 1;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 13: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0; 0;1\}$
MÉDIO ALTO = 0,0

- Regra 14: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 15: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 16: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 17: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 18: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 19: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;1\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 20: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 21: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 22: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 23: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO= 0,0
- Regra 24: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 25: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 26: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 27: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
BAIXO = 0,0

Na computação da parte ENTÃO no caso do BI-1, para a DTE, tem-se que $GdCIAmb=\{BAIXO=0; MÉDIO BAIXO=0; MÉDIO=0; MÉDIO ALTO=0; ALTO=1\}$. Logo, na operação DPE, o índice de desempenho ambiental é alto, com grau de certeza de 100%.

- **Índice de Desempenho Econômico:**

. No caso do BI-2, para o DTE, tem-se para a regra SE:

- Regra 1: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0,80;1\}$
MÉDIO BAIXO = 0
- Regra 2: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0; 0,80;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 3: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0; 0,80;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 4: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0,2;1\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 5: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0,2;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 6: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0,2;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 7: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
BAIXO = 0,0
- Regra 8: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 9: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 10: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0,80;1\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 11: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0,80;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 12: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0; 0,80;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 13: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0,2;1\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 14: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0,2;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 15: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0,2;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0

- Regra 16: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
MÉDIO BAIXO= 0,0
- Regra 17: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 18: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 19: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1; 0,80;1\}$
MÉDIO ALTO = 0,8
- Regra 20: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1; 0,80;0\}$
MÉDIO ALTO= 0,0
- Regra 21: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1; 0,80;0\}$
ALTO = 0,0
- Regra 22: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0,2;1\}$
MÉDIO = 0,2
- Regra 23: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0,2;0\}$
MÉDIO ALTO= 0,0
- Regra 24: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0,2;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 25: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;1\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 26: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO= 0,0
- Regra 27: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0

Na computação da parte ENTÃO no caso do BI-2, para o DTE, tem-se que $GdCIAmb=\{BAIXO=0; MÉDIO BAIXO=0; MÉDIO=0,2; MÉDIO ALTO=0,8; ALTO=0\}$. Logo, na operação DPE, o índice de desempenho ambiental é MÉDIO, com grau de certeza de 20%, e MÉDIO ALTO, grau de certeza de 80%.

- **Índice de Desempenho Social:**

Neste caso, tem-se que, na operação DTE, o índice de desempenho social é BAIXO, com 62% de certeza, e MÉDIO, com 38% de certeza.

Operação DTIA

- **Índice de Desempenho Ambiental:**

. No caso do BI-1, para o DTIA, tem-se para a regra SE:

- Regra 1: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;0,985\}$
ALTO = 0,985
- Regra 2: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;0,015\}$
MÉDIO ALTO = 0,015
- Regra 3: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 4: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0,985\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 5: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0,015\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 6: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 7: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0,985\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 8: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0,015\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 9: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 10: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0,985\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 11: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0,015\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 12: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$
MÉDIO = 0,0

- Regra 13: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0; 0; 0,985\}$ MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 14: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0,015\}$ MÉDIO = 0,0
- Regra 15: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$ MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 16: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0; 0,985\}$ MÉDIO = 0,0
- Regra 17: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0,015\}$ MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 18: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$ MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 19: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1; 0,985\}$ MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 20: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0,015\}$ MÉDIO = 0,0
- Regra 21: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$ MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 22: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0; 0,985\}$ MÉDIO = 0,0
- Regra 23: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0,015\}$ MÉDIO BAIXO= 0,0
- Regra 24: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$ MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 25: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0; 0,985\}$ MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 26: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0,015\}$ MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 27: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$ BAIXO = 0,0

Na computação da parte ENTÃO no caso do BI-1, para a DTIA, tem-se que $GdCI_{Amb} = \{BAIXO=0; \text{MÉDIO BAIXO}=0; \text{MÉDIO}=0; \text{MÉDIO ALTO}=0,015; \text{ALTO}=0,985\}$. Logo, na operação DTIA, o índice de desempenho ambiental é alto, com grau de certeza de 100%.

- **Índice de Desempenho Econômico:**

. No caso do BI-2, para o DTIA, tem-se para a regra SE:

- Regra 1: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
 $\text{MÉDIO BAIXO} = 0$
- Regra 2: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0; 0;0\}$
 $\text{MÉDIO BAIXO} = 0,0$
- Regra 3: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
 $\text{MÉDIO ALTO} = 0,0$
- Regra 4: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;1\}$
 $\text{MÉDIO BAIXO} = 0,0$
- Regra 5: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$
 $\text{MÉDIO BAIXO} = 0,0$
- Regra 6: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$
 $\text{MÉDIO} = 0,0$
- Regra 7: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
 $\text{BAIXO} = 0,0$
- Regra 8: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
 $\text{MÉDIO BAIXO} = 0,0$
- Regra 9: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
 $\text{MÉDIO BAIXO} = 0,0$
- Regra 10: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;1\}$
 $\text{MÉDIO} = 0,0$
- Regra 11: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
 $\text{MÉDIO ALTO} = 0,0$
- Regra 12: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1; 0;0\}$
 $\text{MÉDIO ALTO} = 0,0$

- Regra 13: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;1\}$
MÉDIO BAIXO = 1,0
- Regra 14: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 15: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 16: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;1\}$
MÉDIO BAIXO= 0,0
- Regra 17: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 18: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 19: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 20: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO ALTO= 0,0
- Regra 21: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
ALTO = 0,0
- Regra 22: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;1\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 23: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$
MÉDIO ALTO= 0,0
- Regra 24: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 25: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 26: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO= 0,0
- Regra 27: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0

Na computação da parte ENTÃO no caso do BI-2, para o DTIA, tem-se que $GdCI_{amb} = \{BAIXO=0; MÉDIO\ BAIXO=1,0; MÉDIO=0,0; MÉDIO\ ALTO=0,0; ALTO=0\}$. Logo, na operação DTIA, o índice de desempenho ambiental é MÉDIO BAIXO, com grau de certeza de 100%.

- **Índice de Desempenho Social:**

Neste caso, tem-se que, na operação DTIA, o índice de desempenho social é MÉDIO, com 100% de certeza.

Operação DTI

- **Índice de Desempenho Ambiental:**

. No caso do BI-1, para o DTI, tem-se para a regra SE:

- Regra 1: $FC1 \text{ MIN } \{GdC_{BAIXO}, GdC_{BAIXO}, GdC_{BAIXO}\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;0,83\}$
ALTO = 0,96
- Regra 2: $FC1 \text{ MIN } \{GdC_{BAIXO}, GdC_{BAIXO}, GdC_{MÉDIO}\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;0,17\}$
MÉDIO ALTO = 0,04
- Regra 3: $FC1 \text{ MIN } \{GdC_{BAIXO}, GdC_{BAIXO}, GdC_{ALTO}\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 4: $FC1 \text{ MIN } \{GdC_{BAIXO}, GdC_{MÉDIO}, GdC_{BAIXO}\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0,83\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 5: $FC1 \text{ MIN } \{GdC_{BAIXO}, GdC_{MÉDIO}, GdC_{MÉDIO}\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0,17\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 6: $FC1 \text{ MIN } \{GdC_{BAIXO}, GdC_{MÉDIO}, GdC_{ALTO}\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 7: $FC1 \text{ MIN } \{GdC_{BAIXO}, GdC_{ALTO}, GdC_{BAIXO}\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0,83\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 8: $FC1 \text{ MIN } \{GdC_{BAIXO}, GdC_{ALTO}, GdC_{MÉDIO}\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0,17\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 9: $FC1 \text{ MIN } \{GdC_{BAIXO}, GdC_{ALTO}, GdC_{ALTO}\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 10: $FC1 \text{ MIN } \{GdC_{MÉDIO}, GdC_{BAIXO}, GdC_{BAIXO}\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0,83\}$
MÉDIO ALTO = 0,0

- Regra 11: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0,17\}$ MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 12: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$ MÉDIO = 0,0
- Regra 13: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0,83\}$ MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 14: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0; 0,17\}$ MÉDIO = 0,0
- Regra 15: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$ MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 16: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0; 0,83\}$ MÉDIO = 0,0
- Regra 17: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0,17\}$ MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 18: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$ ALTO = 0,0
- Regra 19: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1; 0,83\}$ MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 20: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0,17\}$ MÉDIO = 0,0
- Regra 21: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$ MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 22: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0; 0,83\}$ MÉDIO = 0,0
- Regra 23: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0,17\}$ MÉDIO BAIXO= 0,0
- Regra 24: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$ MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 25: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0; 0,83\}$ MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 26: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0,17\}$ MÉDIO BAIXO = 0,0

- Regra 27: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
BAIXO = 0,0

Na computação da parte ENTÃO no caso do BI-1, para a DTI, tem-se que $GdCIAmb=\{BAIXO=0; \text{MÉDIO BAIXO}=0; \text{MÉDIO}=0; \text{MÉDIO ALTO}=1,0; \text{ALTO}=0\}$. Logo, na operação DTI, o índice de desempenho ambiental é ALTO, com 83% de certeza, e MÉDIO ALTO, com grau de certeza de 17%.

- **Índice de Desempenho Econômico:**

. No caso do BI-2, para o DTI, tem-se para a regra SE:

- Regra 1: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
MÉDIO BAIXO = 0
- Regra 2: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 3: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 4: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;1\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 5: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 6: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 7: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
BAIXO = 0,0
- Regra 8: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 9: $FC1 \text{ MIN } \{GdCBAIXO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 10: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;1\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 11: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0

- Regra 12: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 13: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;1\}$
MÉDIO BAIXO = 1,0
- Regra 14: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 15: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;1;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 16: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;1\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 17: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 18: $FC1 \text{ MIN } \{GdCMÉDIO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{1;0;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 19: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 20: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 21: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCBAIXO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
ALTO = 0,0
- Regra 22: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;1\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 23: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 24: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCMÉDIO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;1;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0
- Regra 25: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCBAIXO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;1\}$
MÉDIO BAIXO = 0,0
- Regra 26: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCMÉDIO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO = 0,0
- Regra 27: $FC1 \text{ MIN } \{GdCALTO, GdCALTO, GdCALTO\} = 1,0 \text{ MIN } \{0;0;0\}$
MÉDIO ALTO = 0,0

Na computação da parte ENTÃO no caso do BI-2, para o DTI, tem-se que $GdCIAmb=\{BAIXO=0; MÉDIO\ BAIXO=1,0; MÉDIO=0,0; MÉDIO\ ALTO=0,0; ALTO=0\}$. Logo, na operação DTI, o índice de desempenho ambiental é MÉDIO BAIXO, com grau de certeza de 100%.

- **Índice de Desempenho Social:**

Neste caso, tem-se que, na operação DTI, o índice de desempenho social é MÉDIO, com 100% de certeza.