



Taisa Dornelas Abbas

O setor de transportes urbanos por ônibus no Rio de Janeiro e a emissão de gases de efeito estufa

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental (opção profissional).

Orientador: Prof. Celso Romanel



TAISA DORNELAS ABBAS

O setor de transportes urbanos por ônibus no Rio de Janeiro e a emissão de gases de efeito estufa

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental (opção profissional) pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Celso Romanel

Presidente / Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Fernando Luiz Cumplido Mac Dowell da Costa

Co-orientador

PUC-Rio

Prof. Paulo Cezar Martins Ribeiro

UFRJ

Prof. Hostilio Xavier Rattón Neto

UFRJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial de Pós-Graduação
do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de dezembro de 2014.

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

Taisa Dornelas Abbas

Graduou-se em Ciências Econômicas no IBMEC (Instituto Brasileiro de Mercado de Capitais) em 2009. cursou pós-graduação em Gestão Ambiental e Geoprocessamento pela Uni-BH em 2011. Participou do Programa de estágio internacional no Inter-American Development Bank em Washington DC e prestou consultoria para a Petrobras durante cerca de 2 anos. Atualmente trabalha na Fetranspor como analista ambiental.

Ficha Catalográfica

Abbas, Taisa Dornelas

O setor de transportes urbanos por ônibus no Rio de Janeiro e emissão de gases de efeito estufa / Taisa Dornelas Abbas ; orientador: Celso Romanel; co-orientador: Fernando Luiz Cumplido Mac Dowell da Costa. – 2014.

76 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Transporte público. 3. Modais de transporte. 4. Ônibus. 5. Inventário de emissões. 6. Emissão de poluentes. 7. Gases de efeito estufa. 8. Rio de Janeiro (RJ). I. Romanel, Celso. II. da Costa, Fernando Luiz Cumplido Mac Dowell. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Para meu cachorro Homer,
pelo amor incondicional.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus e a São Francisco de Assis por me guiarem em todas as escolhas da minha vida.

Aos meus pais, pela educação, amor e carinho e por me ensinarem os valores que não se aprende em uma escola. Vocês me proporcionaram não somente a oportunidade de se obter mais este diploma, mas todas as ferramentas necessárias para ser feliz e ter sucesso na vida.

Ao meu esposo Luigi, pelo apoio nos momentos mais difíceis e cansativos e pelo amor incondicional todos os dias. Esta é mais uma conquista que conseguimos juntos. Obrigada por tudo e por ser sempre a razão pelo qual canto todas as manhãs.

Aos amigos da Fetranpor por todo apoio necessário, sem os qual este trabalho não poderia ter sido realizado. Agradeço pela oportunidade de aprender mais sobre o tema a cada dia que passa.

À minha querida amiga Claudia Lopes e ao amigo Sérgio Peixoto pela amizade verdadeira.

Aos grandes professores da PUC-Rio, em especial ao meu orientador Fernando pelas importantes contribuições e ajuda sempre que precisei.

À querida Paula Enoy que carinhosamente me auxiliou em todo o curso.

Aos amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

Resumo

Abbas, Taisa Dornelas; Romanel, Celso (Orientador); da Costa, Fernando Luiz Cumplido Mac Dowell (Co-orientador). **O setor de transportes urbanos por ônibus no Rio de Janeiro e a emissão de gases de efeito estufa.** Rio de Janeiro, 2014. 76p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O setor de transporte é importante ator nas emissões de poluentes e gases de efeito estufa. Por isso, estimar as emissões deste setor é essencial para planejar medidas de redução destes poluentes e conseqüentemente mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Neste contexto, na presente dissertação propomos uma metodologia de estimativa de inventário de emissão de gases de efeito estufa para a região metropolitana do Rio de Janeiro e fazemos uma projeção para os próximos anos do aumento da frota e de sua respectiva emissão de poluentes. Desta forma, espera-se que os fazedores de política e de planejamento urbano considerem alternativas menos poluentes, bem como investimento em outros modais para suprir o aumento da demanda para a mobilidade nesta região.

Palavras- chave

Transporte público; modais de transporte; ônibus; inventario de emissões; emissão de poluentes; gases de efeito estufa; região metropolitana do Rio de Janeiro.

Extended Abstract

Abbas, Taisa Dornelas; Romanel, Celso (Advisor); da Costa, Fernando Luiz Cumplido Mac Dowell (Co-advisor). **The bus urban transport sector in Rio de Janeiro and the greenhouse gases emissions**. Rio de Janeiro, 2014. 76p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Now a day the environmental quality is generating discussions around the world. In this context, the main subject is the global warming and the greenhouse emissions. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change studies, the world is experiencing an increase on its average temperature due to anthropogenic emissions that come mainly from burning fossil fuels (primary cause of the increased concentration of CO₂ in the atmosphere) causing the greenhouse effect.

It is well known that the atmosphere is composed of various gases, however, some of them act like a blanket in the terrestrial coverage (and therefore are commonly called greenhouse gases) due to the fact allow the ultraviolet rays and solar radiation penetrating into the earth's atmosphere and retain infrared radiation, they are: water vapor, carbon dioxide, methane, nitrous oxide and chlorofluorocarbons.

Scientists believe that global warming was being intensified due to human activities, especially the beginning of the industrial revolution that have intensified the amount of burning fossil fuels and the forest degradation. According to Stern (2007), the earth's temperature increased about 0.7 ° C since 1900, for that reason, it is believed that global warming has a close relationship with the increase of the greenhouse gas emissions, especially carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄- commonly measured in terms of equivalent CO₂) .

Despite the uncertainty of the consequences of the CO₂ emission, especially in the long run, it is expected that there is a relationship between the increase of this gas and the occurrence of climatic disasters in the world, since unlike most pollutants it's externality occur globally and not locally (IPCC, 2007). According to Schipper and Pelling (2006), climate change resulting from increased greenhouse gas emissions should lead to an increase in global average

temperature, which will result in changes in rainfall regime in the coming decades and changes in the frequency and magnitude of risks such as floods and tropical cyclones, for example.

Stern (2007) points out that the effects of the increase in global temperature, may vary at each region. In general, the author explains that the global warming may change rain regime, both because the warmer air holds more moisture and also because the uneven distribution of heat around the world will make changes in the earth's climate in large-scale.

According to Tower et al. (2009) between the years 2000 and 2005, only the countries of Latin America suffered 309 weather related disasters, 166 floods, 113 windstorms and 30 droughts. The authors also explain that the disasters have low probability to occur more than once in a short period of time but in recent years we can observe a growing number of those, which coincides with the global temperature increases and with increasing emission of this CO₂ same period of time. For this reason, there are various international cooperation agreements for the reduction of greenhouse gases, such as the Rio + 20 conference, the agreement in Copenhagen and the Kyoto Protocol (Schipper and Pelling, 2006).

Of all the sectors that consume fossil fuels, the transportation sector is one of the biggest consumer and consequently as the largest emitter of greenhouse gases (GHG), representing in 2005, 66% of these gases in the energy sector in the State of Rio de Janeiro (GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2011). Moreover, the sector is also the largest emitter of other pollutants such as nitrogen oxides ((NO_x), particulate matter - PM (solid and liquid particulates), hydrocarbons, carbon monoxide (CO), sulfur dioxide, lead and ozone (O₃) (Vasconcellos, 2006). Thus, it is important to properly analyze the emissions from this sector to design effective strategies for reducing emissions of local pollutants and encourage the use of less polluting transport.

Mitigating measures and incentive programs for the reduction of pollutant emissions have been increasingly studied and applied. This study aims to provide inputs to design effective measures in reducing polluting and thus to mitigate the effects of global warming.

Transport modals have different energetic intensities, consumption and pollutant emissions. It is important to clarify what is the most efficient modal per passenger/kilometer, so policy makers can create effective incentives for

sustainable development of large cities. By comparing the different modals of transport it was found that road transport is the most intensive in the emission of pollutants by having petroleum as a primary energy source. In this category, it was found that small vehicles (cars) and motorcycles are the most intensive in terms of emission of CO₂ (passenger /km) and the bus is the most efficient modal. In addition, it is noteworthy that incentives to the consumption of alternative fuels and the development of less pollutant motorization system technology tends greatly reduce the emission of pollutants per unit of energy.

When comparing the road space, considering the bus capacity, it is equivalent to 65 cars or 50 motorcycles. For this reason, the incentives to public transportation (bus and subway) becomes essential for reducing pollution and reduce the use of private vehicles and consequently improving traffic in the city.

In the first part of dissertation was estimated an inventory of greenhouse gases emission for the metropolitan region of Rio de Janeiro and then a projection for the increase in bus fleet was estimated for the next years and their respective emissions. The total annual emissions of CO₂ for the metropolitan bus fleet of the city of Rio de Janeiro is of 1,683,920 tons in 2013 and may reach 1,767,275 in 2015 because of the estimated increase in the fleet by bus. In general, econometric forecasting models are well acceptable and make a fairly realistic estimate based on past data.

For the annual emission of CO, it is estimated that this is around 2100 tons in 2013, and may reach 2233 tons in 2015. For the emission of HC is estimated that this is around 426 tons 2013 and could reach 451 in 2015. For the NOx emission is estimated that this issue be around 10,526 tons in 2013 and may reach 10,813 tons in 2015. Finally for the issue of MP estimates It was found that this is around 173 tons and can reach 176 tons in 2015.

As explained by MacDowell (2012), the increase in the number of vehicles may increase more than proportionately the amount of emissions, since this may result in an increase in the congestion of the roads and traffic period (increased the period of time with car on).

In general, according to the model proposed by Sheiff (1985), the rail transport system is a set of road networks and modals that operate in a dynamic equilibrium tending to result in the same travel time. So, in this matter, an increase in the amount of buses together with the increase number of cars and

motorcycles, the mobility system can become overwhelmed and become a non-efficient solution for improving the urban transport as "... higher the flow time of vehicles, the lower the speed of this flow and therefore the greater the travel time between the origin and destination of the trip, and for greater consequence will be the external environmental impact caused by emissions of gases vehicle ... "(MacDowell, 2012 p.118).

An important solution would be the implementation and extension of metro lines, which it is able to reduce the congestion and it is environmentally friendly because of its low emissions (when compared to other modals) and improving the flow and operating speed of the bus. For cost analysis, however, the metro system requires large amounts of investment with a long-term payback time and the construction period longer than other modals.

A more viable alternative is the system known as Bus Rapid Transit (BRT) which are articulated buses that travel by exclusive lanes, with defined stations to stop and a separate payment system. The system aims to facilitate the buses travel time without traffic intervention of common routes and a considerable reduction of conventional fleet. Along with this system works the Bus Rapid System that are common buses that predominantly have an exclusive line and stops. Both systems are more attractive in cost terms, passenger capacity and the possibility of implementation with considerably less time than the metro system. However, the disadvantage of BRT would be the large number of accidents (compared to the metro system) and the use of fossil fuels.

This study estimated that the constant scenario, the bus fleet will have a growth and consequently the emission of pollutants. This leads us to believe that there is the need for investment in environmental friendly alternatives and modals in order to meet the demand for mobility as long as the population tend to grow in the city of Rio de Janeiro.

Keywords

Public transportation; transportation modals; bus; emissions inventory; emission of pollutants; greenhouse gases; metropolitan region of Rio de Janeiro.

Sumário

1. Introdução	18
1.1. A importância do tema	18
1.2. Objetivo do trabalho	21
1.3. Organização do trabalho	21
2. Mudança climática e os gases de efeito estufa	23
3. O setor de transportes	30
3.1. Características e impactos do setor de transportes	30
3.2. A emissão de poluentes no setor rodoviário	31
3.3. A emissão de poluentes da frota de ônibus na cidade do Rio de Janeiro	36
4. Inventário de emissões do setor de transportes urbanos da região metropolitana do Rio de Janeiro em 2013	43
4.1. Frota de ônibus na região metropolitana do Rio de Janeiro: série histórica, modelo e projeção	46
4.2. Seleção do modelo de previsão: metodologia Box-Jenkins	57
4.3. Identificação do modelo	58
4.4. Estimativa	61
4.5. Checagem de diagnóstico	62
4.6. Previsão	63
4.7. Estimativa de emissão de poluentes	65
4.8. Metodologia alternativa de previsão	67
5. Conclusão	70
6. Referências bibliográficas	74

Lista de tabelas

Tabelas 1 – Possíveis impactos do aquecimento global	24
Tabela 2 – Fontes energéticas no setor de transporte rodoviário	31
Tabela 3 – Fatores de emissão de CO_2 por tipo de combustível	32
Tabela 4 – Rendimento quilométrico e emissões de CO_2 por modalidade	32
Tabela 5 – Emissões relativas de CO_2 do transporte urbano - matriz modal de emissões de CO_2	33
Tabela 6 – Indicadores comparativos entre Ônibus, Motocicletas e Automóveis	33
Tabela 7 – Fatores de emissão de CO, NMHC, RCHO, NO_x , CH_4 e MP para Automóveis, motocicletas e veículos a GNV em $E_{\text{poluente}}/\text{Km}$	34
Tabela 8 – Fatores de emissão de CO, NMHC, RCHO, NO_x , CH_4 e MP para veículos a diesel em $E_{\text{poluente}}/\text{Km}$	35
Tabela 9 – Base de dados do município do Rio de Janeiro no ano de 2012	37
Tabela 10 – Cálculo da emissão de CO_2 por km/Passageiro no ano de 2012 cidade do Rio de Janeiro	38
Tabela 11 – Fator de emissão de CO para motores Diesel, em E_{CO}/Km	38
Tabela 12 – Fator de emissão de NMHC para motores Diesel, em $E_{\text{NMHC}}/\text{Km}$	39
Tabela 13 – Fator de emissão de NO_x para motores Diesel, em $E_{\text{NO}_x}/\text{Km}$	39
Tabela 14 – Fator de emissão de MP para motores Diesel, em E_{MP}/Km	39
Tabela 15 – Fator de emissão por Km e passageiro	40
Tabela 16 – Perfil da frota da cidade do Rio de Janeiro	40
Tabela 17 – Comparativo dos fatores de emissão de poluentes dos automóveis, motocicletas e ônibus urbanos por Km e passageiro.	41
Tabela 18 – Estimativa de emissão dos ônibus articulados nas fases P5 e P7	44
Tabela 19 – Estimativas de consumo para ônibus Urbanos, Articulados e	

Rodoviários no ano de 2013	44
Tabela 20 – Fatores de emissão de poluentes multiplicados pela quilometragem média mensal percorrida por tipo de ônibus	45
Tabela 21 – Quantidade de poluentes emitidos para toda a frota da região metropolitana do Rio de Janeiro por tipo e fase do Proconve	45
Tabela 22 – Quantidade total de poluentes em toneladas /ano em 2013 por fase do proconve	46
Tabela 23 – Emissão total de CO_2 na região metropolitana do Rio de Janeiro em 2013	46
Tabela 24 – Resultados do Teste de Dickey- Fuller de Raiz Unitária	52
Tabela 25 – Resultados do Teste de Dickey Fuller com termo constante	52
Tabela 26 – Resultados do Teste de Dickey Fuller com termo constante e de tendência	53
Tabela 27 – Resultados do teste de normalidade	55
Tabela 28 – Resultados do Teste de Dickey Fuller de Raiz Unitária para série sem tendência	55
Tabela 29 – Resultados do Teste de Dickey Fuller de Raiz Unitária para série sem tendência com o termo constante e sem o termo de tendência	56
Tabela 30 – Resultados do Teste de Dickey Fuller de Raiz Unitária para série sem tendência com o termo constante e o termo de tendência	57
Tabela 31 – Características do processo ARIMA	61
Tabela 32 – Escolha dos modelos ARIMA	63
Tabela 33 – Projeção acumulativa do acréscimo do número de ônibus com a respectiva emissão mensal de poluentes	66
Tabela 34 – Previsão anual de emissão total de poluentes no setor de transportes urbanos na região metropolitana do Rio de Janeiro para os anos de 2014 e 2015	67

Lista de figuras

Figura 1 – Correlograma da série histórica mensal da frota de ônibus da região metropolitana do Rio de Janeiro	50
Figura 2 – Série histórica sem o fator de tendência	54
Figura 3 – Histograma da série histórica sem o fator de tendência	54
Figura 4 – Correlograma da série histórica da frota de ônibus	60
Figura 5 – Correlograma dos resíduos	62

Lista de gráficos

Gráfico 1 – Região metropolitana do Rio de Janeiro	43
Gráfico 2 – Série histórica mensal da frota de ônibus da região metropolitana do Rio de Janeiro dividida por ano	48
Gráfico 3 – Média e Variância por período da série histórica mensal da frota de ônibus na região metropolitana do Rio de Janeiro	49
Gráfico 4 – Projeção da série histórica mensal da frota de ônibus na região metropolitana do Rio de Janeiro até 2016	64
Gráfico 5 – Modelo ARIMA (0,1,1) aplicado à série histórica mensal da frota de ônibus na região metropolitana do Rio de Janeiro	65
Gráfico 6 – Projeção de aumento acumulado mensal da frota até 2016	66
Gráfico 7 – Evolução da frota usando modelo de Holt: Intervalo e série projetada	69
Gráfico 8 – Comparação de projeções usando modelo MA e HOLT	69

Lista de siglas

ADF – Teste de Dickey-Fuller aumentado

AIC – *Akaike Information Criterion*

ARIMA – Modelo auto-regressivo integrado de média móvel

BRT – *Bus Rapid Transit*

BRS – *Bus Rapid System*

C – Celsius

CAK – Curva Ambiental de Kuznets

CCP – *Cities for Climate Protection Campaign*

CFC – Clorofluorcarbono

CH₄ – Metano

CO – Monóxido de carbono

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COP1 – Conferência das Partes 1

CO₂ – Dióxido de carbono

CO_{2e} – Dióxido de carbono equivalente

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito

EMV – Estimador de Máxima Verossimilhança

ERU – *Emission Reduction Units*

FAC – Função de autocorrelação

FACP – Função de Autocorrelação Parcial

GEE – Gases de Efeito Estufa

GMM – Método dos momentos generalizado

GNV – Gás Natural Veicular

H₂O – Água

ICLEI – *International Council for Local Environmental Initiatives*

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

MQO – Mínimos Quadrados Ordinários

MP – Material particulado

NMHC – Hidrocarbonetos não metano

NO_x – Óxido de nitrogênio

N₂O – Óxido nitroso

OECD – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

O₃ – Ozônio

PROCONVE – Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores

RCHO – Aldeídos

UNCDE – *United Nations Conference on Environment and Development*

UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*

1

Introdução

1.1

A importância do tema

Atualmente, a qualidade do meio ambiente vem gerando grandes discussões no mundo. Neste contexto, estão em foco o aquecimento global e consequentemente as emissões de poluentes. De acordo com estudos do *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* (2007), o mundo estaria vivenciando um aumento na temperatura média em virtude das emissões antropogênicas advindas principalmente da queima de combustíveis fósseis (primordial causa do aumento da concentração de CO_2 na atmosfera) causando o chamado efeito estufa. Assim como descreve Duraiappah (1993), a atmosfera é composta de vários gases, no entanto, alguns deles agem como um cobertor sob a cobertura terrestre (e por isso são comumente chamados de gases de efeito estufa) devido ao fato de permitirem que os raios ultravioleta e a radiação solar penetrem na atmosfera da terra e por reterem a radiação infravermelha, são eles: vapor d'água, o dióxido de carbono, o metano, o óxido nitroso e o clorofluorcarbono.

Cientistas acreditam que o efeito estufa estaria sendo intensificado devido às ações antrópicas, com destaque para o início da revolução industrial que proporcionou intensa queima de combustíveis fósseis e a constante degradação florestal dos últimos anos. Segundo Stern (2007), o planeta terra aumentou cerca de 0.7°C desde 1900. Devido a isso, acredita-se que o aquecimento global possui a estreita relação com o aumento da emissão de gases poluentes, principalmente dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4 - comumente medido em termos de CO_2 equivalente).

Apesar de não se saber ao certo as consequências da emissão de CO_2 principalmente no longo prazo, acredita-se que exista uma relação entre o aumento deste gás e a ocorrência de desastres climáticos no mundo, uma vez que diferentemente da maioria dos outros poluentes, a externalidade da emissão de

CO₂ ocorre de forma global e não local (IPCC, 2007). Assim como destaca Schipper e Pelling (2006), as mudanças climáticas resultantes do aumento das emissões de gases de efeito estufa deve levar a um aumento da temperatura média global, que resultará em mudanças no regime de precipitações nas próximas décadas e que gerará alterações na frequência e na magnitude dos riscos associados como enchentes e ciclones extratropicais, por exemplo.

Stern (2007) ressalta que se estima que os efeitos do aumento da temperatura global podem variar de acordo com cada região. De uma forma geral, o autor explica que o aquecimento global irá alterar os padrões de chuva, tanto porque o ar mais quente retém mais umidade quanto porque a distribuição desigual do calor ao redor do planeta irá ocasionar em mudanças nos regimes climáticos de grande escala.

De acordo com Torre et. al. (2009) entre os anos de 2000 e 2005, somente os países da América Latina sofreram 309 desastres relacionados ao clima, sendo 166 inundações, 113 vendavais e 30 secas. Os autores ainda explicam que os eventos extremos possuem baixas probabilidades de ocorrerem em um curto espaço de tempo mas nos últimos anos pode-se observar um crescente número destes, o que coincide com o aumento da temperatura global e com o aumento da emissão de CO₂ neste mesmo período de tempo. Por esta razão, existem vários acordos de cooperação internacional para sua redução dos gases de efeito estufa, como por exemplo, a cúpula da Rio +20, o acordo de Copenhague e o Protocolo de Kyoto (Schipper e Pelling, 2006).

Estudiosos acreditam na hipótese da Curva Ambiental de Kuznets (CAK) pelo qual sugere uma relação empírica entre a renda per capita dos países e a emissão de CO₂ em formato de “U” invertido, onde a emissão de poluentes cresce conforme o aumento da renda até certo ponto pelo qual esta passa a decrescer. De acordo com Stern et. al. (1996), esta hipótese seria explicada devido ao fato de que países com baixo nível de desenvolvimento degradam mais o meio ambiente graças aos impactos de uma economia intensiva na produção (na agricultura e na produção industrial), e países com alto nível de desenvolvimento devido às políticas regulatórias, aumento da tecnologia (aumento da eficiência na produção e investimentos em tecnologias limpas) e por serem mais intensivos em serviços,

passam a ser mais conservadores com o meio ambiente e conseqüentemente passam a degradar menos.

É importante ressaltar que o desenvolvimento econômico por si só não se mostra suficiente para solucionar os problemas relacionados ao meio ambiente, uma vez que a CAK não se aplica a todos os tipos de poluentes. Além disso, assim como explica Stern (2007), a renda estimada no ponto de inflexão da curva é alta e para países pobres e em desenvolvimento alcançarem este nível de renda demorariam muito tempo. Entretanto, independentemente do nível do desenvolvimento econômico do país, é necessário traçar medidas efetivas e sustentáveis principalmente por se tratar de uma externalidade que irá afetar as gerações futuras.

Dentre todos os setores que consomem combustíveis fósseis, o setor de transportes se enquadra entre o maior consumidor e conseqüentemente como o maior emissor de gases de efeito estufa (GEE), representando no ano de 2005, 66% do total destes gases no setor de energia no Estado do Rio de Janeiro (GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2011). Além disso, o setor também é um grande emissor de poluentes locais como: óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado – MP (partículas líquidas e sólidas), hidrocarbonetos, monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre, chumbo e ozônio (O_3) (VASCONCELLOS, 2006). Assim, é importante analisar corretamente as emissões deste setor para se traçar estratégias efetivas de redução da emissão de poluentes locais e incentivar o uso de transportes menos poluidores.

Desta forma, medidas mitigadoras e programas de incentivos para a redução das emissões de poluentes vêm sendo cada vez mais estudados e aplicados. Portanto, visando fornecer insumos para se traçar medidas efetivas na redução da emissão poluentes e conseqüentemente visando mitigar os efeitos do aquecimento global, a proposta deste trabalho se torna essencial para tal, dado que este é um assunto de grande importância no contexto mundial atual.

1.2

Objetivo do trabalho

O presente trabalho visa mostrar a importância do setor de transportes nas emissões de gases de efeito estufa e fazer um comparativo destas emissões nos diferentes modais existentes. Para tal, foram utilizados dados da cidade do Rio de Janeiro visando tornar o estudo mais próximo da realidade. Desta forma, buscou-se também traçar estratégias para a redução da emissão de poluentes no setor.

O objetivo é analisar principalmente a emissão de dióxido de carbono, que é o principal gás de efeito estufa, mas visando complementar o estudo, foram considerados também outros gases importantes emitidos através da queima de gasolina e diesel como: monóxido de carbono (CO), material particulado (MP), hidrocarbonetos não metano (NMHC), metano (CH₄), aldeídos (RCHO) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Tendo em vista a necessidade de redução dos gases de efeito estufa no mundo, pretende-se mostrar a importância do setor de transportes no total destas emissões e desta forma, possibilitar que os fazedores de política tracem uma estratégia sustentável para mitigar as emissões locais na cidade do Rio de Janeiro. Será mostrado o comportamento das emissões de CO₂ ao longo dos últimos anos e sua respectiva representatividade no total das emissões considerando os diversos setores da economia.

1.3

Organização do trabalho

O estudo está dividido em cinco capítulos, índice de tabelas, índice de figuras, referências bibliográficas e anexos. O capítulo 1 é a introdução do trabalho e apresenta 3 itens, sendo eles: Importância do tema, Objetivo do trabalho e Organização do trabalho.

O capítulo 2 fornece uma explicação do efeito estufa, principais gases que contribuem para o aquecimento global, os efeitos e consequências da emissão destes gases e um breve histórico dos principais acordos de cooperação internacional.

O capítulo 3 aborda o setor de transportes, seus principais modais, consumo de energia e respectivas emissões de gases de efeito estufa. Este capítulo descreve a metodologia e os respectivos cálculos de emissão de CO₂ e outros poluentes no setor de transportes urbanos na cidade do Rio de Janeiro no ano 2012 e na região metropolitana do Rio de Janeiro no ano de 2013.

O capítulo 4 descreve a metodologia utilizada para fazer uma estimativa de crescimento da frota para os próximos 2 anos e estima também a emissão de poluentes neste mesmo período.

O capítulo 5 apresenta a conclusão, sugestões para futuros estudos e considerações finais.

2

Mudança climática e os gases de efeito estufa

Assim como explica Giddens (2010), existe uma diferença entre a energia (radiação infravermelha) que chega e sai da Terra. Esta diferença se dá devido ao fato de que alguns gases agem como uma manta conservando parte do calor que chega ao planeta, gerando o chamado efeito estufa. Devido a esta característica, estes gases são chamados de gases de efeito estufa - GEE e dentre eles se encontram: o dióxido de carbono ou gás carbônico (CO_2), o metano (CH_4) comumente medido em termos de CO_2 equivalente (CO_2e), o vapor d'água (H_2O), o ozônio (O_3), o óxido nitroso (N_2O) e os compostos de clorofluorcarbono (CFC).

O efeito de aquecimento provocado pelos GEE foi essencial para tornar a temperatura do planeta habitável, no entanto, nas últimas décadas, principalmente após a expansão industrial que demandou grandes quantidades de energia advinda em grande parte de combustíveis fósseis, estima-se que a concentração de GEE na atmosfera tenha aumentado e conseqüentemente a média da temperatura global.

A medida que o consumo de energia foi aumentando ao longo dos anos, cresceram também os impactos ambientais relacionados a produção e utilização deste insumo e principalmente a preocupação com a poluição gerada. Apesar de necessário para o desenvolvimento, o uso intensivo de combustíveis fósseis ainda é fator preocupante para o bem estar da sociedade. De uma forma geral, os problemas ambientais podem ser divididos de acordo com o meio físico (água, ar ou solo) que a poluição está sendo gerada e sua amplitude (local, regional ou global). No caso do aquecimento global, independente de onde a poluição está sendo gerada, as conseqüências afetam toda a população mundial. A tabela 1 abaixo lista as possíveis conseqüências para o aumento de cada grau celsius da temperatura média global.

Tabelas 1 – Possíveis impactos do aquecimento global

Aumento da temperatura (°C)	Água	Comida	Saúde	Terra	Meio Ambiente	Impactos inesperados e de larga escala
1°C	Pequenas geleiras nos Andes desaparecem por completo, ameaçando o suprimento de água de 50 milhões de pessoas	Aumento modesto na produção de cereais em regiões temperadas	Pelo menos 300 mil pessoas morrem de doenças relacionadas com o clima (predominantemente a diarreia, malária e má nutrição). Redução da mortalidade no inverno nas latitudes mais altas (Norte da Europa e USA)	Degelo do pergelissolo causando danos a prédios e estradas em partes do Canadá e Rússia	Pelo menos 10% das espécies terrestres ameaçadas de extinção (de acordo com uma estimativa) 80% de branqueamento dos recifes de coral, incluindo a Grande barreira de corais	Circulação Termoalina do atlântico começa a se debilitar
2°C	Queda potencial de 20-30% da disponibilidade de água em algumas regiões vulneráveis. Ex. Sul da África e Mediterrâneo	Quedas acentuadas na produtividade e das safras nas regiões tropicais (5-10% na África)	Entre 40 -60 milhões de pessoas a mais expostas à malária na África	Até 10 milhões de pessoas a mais afetadas pelas inundações costeiras a cada ano	Entre 15-40% de espécies ameaçadas de extinção (de acordo com uma estimativa) Risco elevado de extinção de espécies do Ártico, incluindo o urso polar e a rena	Potencial irreversível de derretimento da camada de gelo da Groenlândia, acelerando o aumento do nível do mar e comprometendo o mundo para um eventual aumento de 7 metros do nível do mar
3°C	Sérias estiagens ocorrem no sul da Europa uma vez a cada 10 anos Entre 1 e 4 bilhões a mais de pessoas sofrendo com a escassez de água, enquanto entre 1 e 5 bilhões recebem água, o que pode aumentar o risco de inundações	Mais 150 - 550 milhões com o risco de passar fome (se a fertilização do carbono enfraquecer) Produtividade e agrícola em latitudes mais elevadas possivelmente podem chegar ao auge	Entre 1 e 3 milhões de pessoas a mais morrem de má nutrição (se a fertilização do carbono enfraquecer)	Entre 1 e 170 milhões de pessoas a mais afetadas pelas inundações costeiras a cada ano	Entre 20-50% de espécies ameaçadas de extinção (de acordo com uma estimativa), incluindo 25-60% dos mamíferos, de 30-40% dos pássaros e 15-70% das borboletas na África do Sul Início do colapso da floresta amazônica	Aumento do risco de mudanças inesperadas na circulação atmosférica (Ex. a monção) Aumento do risco de colapso da camada de gelo no oeste da Antártica Aumento do risco de colapso da circulação termoalina do Atlântico

4°C	Queda potencial de 30 a 50% na disponibilidade de água no sul da África e no Mediterrâneo	Produtividade agrícola cai entre 15 e 35% na África e completamente nas regiões aos redores da Austrália.	Até 80 milhões de pessoas a mais expostas a malária na África	Entre 7 e 300 milhões de pessoas a mais afetadas pelas inundações costeiras a cada ano	Perda de cerca da metade da tundra do Ártico Cerca da metade das reservas naturais não podem mais satisfazer os objetivos
5°C	Possível desaparecimento de grandes geleiras no Himalaia, afetando um quarto da população da China e centenas de milhares de pessoas na Índia	Aumento contínuo na acidez dos oceanos desregulando o ecossistema marinho e possivelmente os estoques de peixes		Aumento do nível do mar ameaçando pequenas ilhas, áreas costeiras de baixa altitude (Flórida) e a maioria das cidades do mundo como Nova Iorque, Londres e Tóquio	
Mais de 5°C	A ciência atual sugere que a temperatura média global irá aumentar mais de 5 ou 6°C se as emissões continuarem a crescer e se os feedbacks positivos aumentarem o efeito de aquecimento dos gases de efeito estufa (Ex. liberação de dióxido de carbono do solo ou metano do pergelissolo). Este nível de aumento da temperatura global seria equivalente a quantidade de calor que ocorreu entre a última era até os dias atuais - e é provável que leve a uma grande perturbação e movimentação em grande escala da população. Tais efeitos de contingência social podem ser catastróficos mas são atualmente bastante difíceis de captar com os modelos atuais visto que o ser humano não conviveu com este nível de temperatura.				

Fonte: Stern (2007) p.66 e 67 – Tradução do autor

Apesar de incertas, as várias medidas estão sendo criadas visando amenizar as consequências negativas que possam ocorrer no futuro da emissão de GEE. Trata-se de um problema claro de externalidade negativa de extensa e complicada definição de direito de propriedade. Métodos alternativos de incentivos como a taxação daqueles que produzem poluição (de modo que o ótimo será a menor emissão de CO₂) já foram discutidas por alguns autores. Contudo, Stern (2007) defende que a taxação seria um meio não eficiente, pois as taxas teriam que ter o mesmo preço em todos os países e setores para não ter efeitos sobre a competição, sendo que cada país possui sua particularidade e nível de desenvolvimento, o que não seria justo taxa-los da mesma maneira. Além disso, não se sabe ao certo quanto tempo seria necessário para a obtenção dos resultados esperados, visto que o processo de taxação por si só não é um mecanismo efetivo. Desta forma, a criação de políticas parece ser o único meio de incentivar os países a reduzirem a emissão de gases que prejudicam o meio ambiente.

As Nações Unidas, visando mitigar os efeitos das mudanças climáticas, investiu na criação de uma política comum para a redução de gases que seriam a causa antropogênica do aquecimento global. Tendo em vista a independência de cada país e a não existência de um órgão superior aos estados que forçariam os mesmos a aderirem à nova política tem dificultado o processo. O fato é que, por meio do método de cooperação, cada país teria um custo diferente e não seria vantajoso para alguns deles aderir à essa política de redução. Um país desenvolvido, por exemplo, tem um custo maior para frear o crescimento econômico e uma maior perda de bem estar para a população que um país subdesenvolvido. Para cada nível de desenvolvimento tem-se diferentes fontes de emissões o que desestimularia a economia de cada país de forma diferente. Além disso, a não adesão dos principais países emissores desestimularia outros a aderirem também, dado que todos os países estão aptos a sofrerem as consequências da não adesão dos principais emissores.

Neste contexto, diversos acordos internacionais visam reduzir o nível de emissão de gases de efeito estufa e conseqüentemente mitigar os efeitos relacionados a estas emissões. Sem incentivos para a redução da emissão de gases, a perspectiva é de que, assim como os países desenvolvidos, os países em desenvolvimento e os subdesenvolvidos cresçam cada vez mais, criando mais indústrias, aumentando a demanda por combustíveis fósseis, aumentando ainda mais a população e, conseqüentemente, o consumo. Seguindo este raciocínio, a previsão é de que a quantidade total de gases emitidos seja cada vez maior e de que os efeitos da mudança na temperatura mundial tenham conseqüências graves e que seriam sentidas à medida que o estoque de GEE aumenta na atmosfera.

De acordo com Bartsch e Müller (2000), as preocupações com as mudanças no clima tiveram início por volta de 1979, na Primeira Conferência Mundial do Clima (*First World Climate Conference*) e foram amadurecendo na Conferência Ministerial de Noordwijk (*Noordwijk Ministerial Conference*) em 1989 e na Segunda Conferência Mundial do Clima (*Second World Climate Conference*) em 1990.

Em 1992, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (*United Nations Conference on Environment and Development - UNCDE*) ou comumente chamada de Conferência do Rio e Cúpula da Terra, introduziu o conceito de desenvolvimento sustentável e deu início a um acordo

entre as nações para evitar as possíveis consequências que a mudança no clima poderia trazer ao planeta e à humanidade (Bartsch e Müller, 2000). O acordo teve como princípios a equidade do sistema climático para as gerações futuras e presentes e a promoção do desenvolvimento sustentável. Além disso, deu início a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança no Clima (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) que foi um tratado assinado por quase todos os países e que teve como princípio a estabilização dos GEE na atmosfera. Os países membros desta convenção se reúnem periodicamente nas reuniões conhecidas como Conferência das Partes, que teve sua primeira reunião (COP1) realizada em 1995 em Berlim, pelo qual resultou na assinatura do Mandato de Berlim.

Como uma forma de continuação do Mandato, em 1997 foi realizada a Convenção de Quioto, que deu origem ao conhecido como Protocolo de Quioto. Este protocolo estabeleceu um teto para a emissão de gases; cada país poderia utilizar uma alíquota baseada no volume de emissão de 1990. A redução se aplica apenas para os países do Anexo 1, que inclui a maioria dos países desenvolvidos, dentre eles os membros da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (*Organization for Economic Cooperation and Development – OECD*) e países do leste europeu (Bartsch e Müller, 2000). Esse sistema levou ao surgimento de três mecanismos de mercado: Comércio Internacional das Emissões, Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e a Implementação Conjunta.

O mecanismo de Comércio Internacional das Emissões permite que os países (pertencentes ao Anexo B do protocolo) que não conseguirem atingir a meta estabelecida possam comprar créditos de países que cujos níveis de emissão estavam abaixo da cota proposta pelo protocolo, em outras palavras, para os créditos serem vendidos, o país deve emitir menos do que a permissão que ele tem para emitir certa quantidade. Desta forma, o carbono passou a ser negociado e controlado como uma *commodity* dando origem ao mercado de carbono. Vale ressaltar que tendo em vista os países com créditos excedentes ao necessário não venda sua cota além da sua capacidade de satisfazer suas próprias metas, cada país é obrigado a manter uma reserva de redução das emissões. Esta reserva conhecida como “reserva do período de compromisso” não deverá ser menor que 90% do total atribuído ao país, ou 100% dos últimos cinco inventários, sendo, considerado o menor valor dentre estes.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo permite que países com redução de emissões ou com as emissões limitadas (pertencentes ao Anexo B do protocolo), implemente um projeto de redução de emissão de carbono em países em desenvolvimento. Nestes projetos, a redução das emissões é certificada e podem ser vendidas, auxiliando os países a atingirem a suas metas. Vale ressaltar que o projeto deve promover uma redução nas emissões pelas quais não ocorreriam se o projeto não existisse. Este mecanismo considerado pioneiro estimula o desenvolvimento sustentável nos países em desenvolvimento, além de permitir que estes países recebam investimentos em tecnologias limpas.

O último mecanismo de mercado é a Implementação Conjunta, pelo qual permite que um país (pertencente ao Anexo B do protocolo) ganhe Unidades de Redução de Emissão (*Emission Reduction Units – ERU*) pelas reduções efetivas ou por projetos de remoção de emissão que sejam aplicados também em países do Anexo B. Este mecanismo permite que um país consiga alcançar seus objetivos no protocolo e que o país anfitrião receba investimento estrangeiro e transferência tecnológica.

Assim como explica Bartsch e Müller (2000), apesar do Protocolo de Quioto ser um importante passo para reduzir as emissões globais, ele por si só não é o suficiente para frear o aumento da concentração de GEE na atmosfera, principalmente pelo fato de que países em desenvolvimento não são obrigados a reduzirem suas emissões.

Uma importante convenção também foi a Convenção de Vienna para a proteção da camada de Ozônio (*Vienna Convention for the protection of the Ozone Layer*), a qual teve como principal objetivo proteger a saúde e o meio ambiente contra os possíveis efeitos decorrentes das modificações na camada de ozônio. O acordo teve o intuito de fazer observações e pesquisas sobre a camada de ozônio, além de criar medidas e um acordo de cooperação para reduzir as modificações que a atividade humana estava causando na camada de ozônio, o que inclui, também, a redução na emissão de CO_2 .

Logo em seguida, como uma continuação da Convenção de Vienna, surgiu o protocolo de Montreal para combater substâncias que empobrecem a camada de Ozônio (*Montreal Protocol on substances that deplete the Ozone Layer*). Esse protocolo leva em consideração o consumo e a produção de bens e incentiva a eficiência econômica através da racionalização industrial.

Além destas iniciativas, em 1990 foi criado o Conselho Internacional para Iniciativas Ambientais Locais (*International Council for Local Environmental Initiatives - ICLEI*), hoje chamado de Governos locais pela Sustentabilidade (*Local Governments for Sustainability*), que é uma associação de governos locais que pelo qual através de ações locais, visa o comprometimento de cidades para o desenvolvimento sustentável. Dentre os principais projetos desta associação se encontram a Agenda 21 (que teve início na Conferência do Rio em 1992) e a Campanha das Cidades para Proteção do Clima (*Cities for Climate Protection Campaign - CCP*).

A Agenda 21 é um plano de ação em todas as áreas em que as ações humanas alteram o meio ambiente. Estas ações podem ser adotadas localmente, nacionalmente ou globalmente, sendo que cada localidade desenvolve sua própria Agenda e suas metas.

A Campanha das Cidades para Proteção do Clima é uma iniciativa que através de assistência para as cidades busca mitigar os efeitos das mudanças climáticas pela redução da emissão dos GEE locais.

Todas estas iniciativas e acordos internacionais se dão pelo fato que de acordo com Stern (2007), as mudanças climáticas são um problema de externalidade que implica em custos que não são pagos por aqueles que criam as emissões. Existem características específicas deste tipo de externalidade que difere dos tipos como: as consequências globais, impactos duradouros, incertezas e riscos nos impactos econômicos. Desta forma, países não emissores possuem incentivos para ratificarem acordos visto que esta seria uma possibilidade de minimizar os custos com as consequências das emissões realizadas por outros países.

3

O setor de transportes

3.1

Características e impactos do setor de transportes

O aumento populacional e conseqüentemente dos grandes centros urbanos, faz com que o setor de transportes cresça cada vez mais. Este crescimento, no entanto, gera diversos impactos negativos locais, uma vez que atingem as pessoas diretamente na área em que vivem, e até mesmo globais, ou seja, não se restringe a um dado espaço afetando o planeta como um todo. Segundo Vasconcellos (2006), dentre os impactos locais estão: efeito barreira (prejuízo às relações sociais nas vias), os acidentes de trânsito, o congestionamento e a poluição ambiente local. Vale ressaltar que ainda existem os efeitos secundários na saúde da população devido à poluição. Já para os impactos negativos globais temos a emissão de gases de efeito estufa que é uma grande externalidade negativa deste setor.

No Brasil, segundo o Balanço Energético Nacional do Ministério de Minas e Energia (2013), o setor de transportes é o segundo maior consumidor de energia do país, com cerca de 31% do consumo final de energia em 2012. No setor, os derivados de petróleo são as principais fontes de energia consumida, tendo, no ano de 2012, o óleo diesel (48,1%) e gasolina automotiva (30,8%) como os dois principais combustíveis (MME, 2013). Os combustíveis alternativos como biocombustíveis (diesel de cana e álcool etílico ou etanol), gás natural veicular e eletricidade (elétricos a bateria) representam uma pequena parcela no consumo de combustíveis e vem sendo utilizados como substitutos mais limpos dos derivados de petróleo atualmente consumidos no sistema de transporte. Estes combustíveis são menos poluentes e menos prejudiciais a saúde e ao meio ambiente. Devido à divergência no consumo de combustíveis, bem como sua respectiva intensidade energética, cada modal de transporte emite diferentes quantidades de poluentes. Desta forma, é necessário comparar o impacto relativo no espaço e no meio

ambiente de cada modal e tipos de combustíveis para se criar incentivos efetivos visando o desenvolvimento sustentável.

3.2

A emissão de poluentes no transporte rodoviário

Atualmente no país, o transporte rodoviário é o principal meio de transporte de cargas e de passageiros. Este modal é o mais intensivo no consumo de energia dentre todos do setor de transportes e a sua fonte energética se caracteriza de acordo com a Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Fontes energéticas no setor de transporte rodoviário

Fonte de energia	Ano 2012
Gás Natural	2,3%
Óleo Diesel	50,4%
Gasolina Automotiva	33,6%
Álcool Etílico Anidro	5,7%
Álcool Etílico Hidratado	7,9%
Total	100,0%

Fonte: MME (2013)

Como pode ser visto na tabela acima, o setor se caracteriza em grande parte por derivados de petróleo. De uma forma geral, a queima destes combustíveis emitem diferentes quantidades de poluentes e causam consequências negativas para a população nos níveis local, regional e global. Para o nível local, os poluentes afetam a saúde humana diretamente, sendo eles: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos e o material particulado. Para o nível regional, os poluentes causam ainda a chuva ácida e o efeito *smog*. Já para o nível global, o dióxido de carbono (CO₂) é o poluente que mais contribui para o efeito estufa (VASCONCELLOS, 2006).

Assim como explica Carvalho (2011), as pessoas associam a poluição a veículos grandes e velhos (ônibus e caminhões), pelo fato destes emitirem mais fumaça preta (material particulado) do que os outros. Estes veículos em grande

parte utilizam diesel como combustível que conforme a Tabela 3, é o mais intensivo de CO₂ (principal na categoria dos GEE) dentre todos os combustíveis.

Tabela 3 – Fatores de emissão de CO₂ por tipo de combustível

Combustível	CO₂
Gasolina A (Kg/L)	2,269
Etanol Anidro (Kg/L)	1,233
Etanol Hidratado (Kg/L)	1,178
GNV (Kg/m ³)	1,999
Diesel (Kg/L)	2,671

Fonte: MMA (2011)

Além disso, os ônibus e veículos pesados são os que mais emitem CO₂ quando se compara o rendimento energético e as respectivas emissões por Km (como pode ser visto na tabela 4) de cada modal.

Tabela 4 – Rendimento quilométrico e emissões de CO₂ por modalidade

Modalidade	Rendimento energético Km/l ou Lm/KWh (A)	Emissões por fonte energética Kg de CO₂/l ou KWh (B)	Emissões quilométricas kg de CO₂/Km (B/A)
Metrô	0,028	0,087	3,16
Ônibus	2,5	3,2	1,28
Automóvel ¹	8,5	1,747	0,19
Motocicleta ²	30	2,307	0,07
Veículos pesados	2,5	3,2	1,28

Nota: ¹ Emissão média ponderada pelo consumo total de álcool e gasolina

² Considerando a mistura de 25% de álcool na gasolina

Fonte: Carvalho (2011)

No entanto, quando comparados com outros modais (por passageiro e Km), estes veículos junto com o metrô, são na verdade os que menos poluem, como pode ser visto na tabela 5.

Tabela 5 – Emissões relativas de CO₂ do transporte urbano - matriz modal de emissões de CO₂

Modalidade	Emissões quilométricas Kg de CO₂Km	Ocupação média de veículos de passageiros	Emissões/Kg de CO₂/pass. Km¹
Metrô	3,16	900	0,0035
Ônibus	1,28	80	0,0160
Automóvel ²	0,19	1,5	0,1268
Motocicleta	0,07	1,0	0,0711
Veículos pesados	1,28	1,5	0,8533

Nota: ¹ Emissões considerando a extensão das viagens iguais (ext. igual) e extensão da viagens de transporte público duas vezes maior que a individual (Ext. TP=2xTI).
² Valores médios das Pesquisas Origem Destino das capitais selecionadas.

Fonte: Tabela adaptada de Carvalho (2011)

De acordo com Carvalho (2011), os automóveis são responsáveis por 60% das emissões totais de CO₂ comparados com 25% do transporte público coletivo. A eficiência dos ônibus também pode ser vista mesmo quando se compara os diferentes modais em termos de intensidade energética e os demais poluentes.

Tabela 6 – Indicadores comparativos entre Ônibus, Motocicletas e Automóveis

Modalidade	Ocupação Pessoa/ Modo	Índices relativos por Pass/Km	
		Energia ¹	Poluição ²
Ônibus	50,0	1,0	1,0
Motocicleta	1,0	4,5	32,3
Automóvel	1,3	12,7	17,0

Nota: ¹Base calculada em grandes equivalentes de petróleo (diesel e gasolina)
² Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarbonetos (HC), Óxidos de Nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP)

Fonte: NTU (2009)

Em linhas gerais, de acordo com os dados da tabela acima, cada unidade de ônibus é equivalente a 65 carros ou 50 motocicletas para o mesmo número de passageiros. Entretanto, no tangente à poluição, as motocicletas poluem 32 vezes mais e os automóveis 17 vezes mais que os ônibus. Além disso, as motocicletas gastam 5 vezes mais energia que o ônibus por pessoas transportada e os automóveis 13 vezes mais. Isso torna o transporte público o mais eficiente em

termos de eficiência energética e ambientalmente (por ser menos poluente por passageiro e km).

No tangente a poluição do ar, a tabela 7 e 8 compara os fatores de emissão dos automóveis, motocicletas, veículos a diferentes combustíveis (incluindo GNV) e veículos a diesel. Vale ressaltar que as indústrias de ônibus vêm produzindo motores cada vez mais eficientes e com menor índice de emissão de poluentes. Isso pode ser notado através da tabela 8 que compara as emissões com as diferentes fases do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve), que foi um programa instituído pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama) em 1986 com o objetivo de reduzir a emissão de poluentes para veículos leves e pesados.

Tabela 7 – Fatores de emissão de CO, NMHC, RCHO, NO_x, CH₄ e MP para Automóveis, motocicletas e veículos a GNV em g_{poluente}/Km

Poluentes		Monóxido de carbono (CO)	Óxidos de nitrogênio (NO _x)	Material particulado (MP)	Aldeídos (RCHO)	NMHC	Metano (CH ₄)
Automóveis e comerciais leves do ciclo Otto	Gasolina C	0,3	0,02	0,0011	0,0017	0,034	0,011
	Flex - Gasolina C	0,33	0,03	0,0011	0,0024	0,032	0,011
	Flex - Etanol hidratado	0,56	0,032	-	0,0104	0,03	0,011
Motocicletas	Gasolina C	1,02	0,1	0,0035	-	0,14	0,03
Veículos a GNV		0,56	0,29	-	0,0038	0,026	0,22

Fonte: Adaptado de MMA (2011)

Tabela 8 – Fatores de emissão de CO, NMHC, RCHO, NO_x, CH₄ e MP para veículos a diesel em g_{poluente}/Km

Poluentes		Monóxido de carbono (CO)	Óxidos de nitrogênio (NO _x)	Material particulado (MP)	Aldeídos (RCHO)	NMHC	Metano (CH ₄)	
Veículos de ciclo Diesel	Comerciais leves	Pré-Proconve, P1 e P2	0,77	0,28	0,274	-	4,45	-
		P3	0,69	0,23	0,136	-	2,81	-
		P4	0,38	0,13	0,053	-	2,74	-
		P5	0,35	0,07	0,033	-	1,98	-
		P7	0,37	0,07	0,008	-	0,8	-
	Caminhões leves	Pré-Proconve, P1 e P2	0,92	0,34	0,328	-	5,31	-
		P3	0,83	0,28	0,163	-	3,36	-
		P4	0,45	0,15	0,064	-	3,28	-
		P5	0,42	0,08	0,04	-	2,37	-
		P7	0,44	0,09	0,01	-	0,96	-
	Caminhões médios	Pré-Proconve, P1 e P2	1,26	0,46	0,449	-	7,28	-
		P3	1,14	0,38	0,223	-	4,6	-
		P4	0,62	0,21	0,087	-	4,49	-
		P5	0,58	0,11	0,054	-	3,25	-
		P7	0,6	0,12	0,013	-	1,31	-
	Caminhões pesados	Pré-Proconve, P1 e P2	2,21	0,81	0,785	-	12,73	-
		P3	1,99	0,66	0,391	-	8,04	-
		P4	1,08	0,37	0,153	-	7,85	-
		P5	1,01	0,19	0,095	-	5,68	-
		P7	1,06	0,2	0,023	-	2,3	-
Ônibus urbanos	Pré-Proconve, P1 e P2	3,06	1,12	1,084	-	17,57	-	
	P3	2,75	0,92	0,539	-	11,1	-	
	P4	1,5	0,51	0,211	-	10,84	-	
	P5	1,39	0,27	0,131	-	7,84	-	
	P7	1,46	0,28	0,032	-	3,17	-	

		Pré-Proconve, P1 e P2	2,32	0,85	0,823	-	13,34	-
	Ônibus rodoviários	P3	2,08	0,69	0,409	-	8,43	-
		P4	1,14	0,39	0,16	-	8,23	-
		P5	1,06	0,2	0,099	-	5,95	-
		P7	1,11	0,21	0,024	-	2,4	-

Fonte: Adaptado de MMA (2011)

Isso mostra que com o progresso da tecnologia, existe uma tendência cada vez maior de redução das emissões de poluentes dos ônibus. Além disso, estas novas tecnologias tendem a incentivar a utilização dos biocombustíveis, que por serem menos poluentes, tendem a reduzir as emissões nos próximos anos. Desta forma, conclui-se que a poluição emitida pelo sistema de transporte rodoviário, em especial pelos ônibus, quando comparados aos outros modais é a menor e mais eficiente por passageiro/ Km, com tendência a cair conforme o avanço dos sistemas de motorização e substituição dos combustíveis derivados do petróleo para aqueles alternativos renováveis.

3.3

A emissão de poluentes da frota de ônibus na cidade do Rio de Janeiro

Alguns fatores influenciam diretamente na taxa de emissão de poluentes dos ônibus na cidade do Rio de Janeiro – potência média, rota, temperatura, rendimento por km, tipo de combustível, idade do veículo e etc.

Este estudo buscou tornar a estimativa mais próxima da realidade possível. Para tal, foi utilizada a base de dados da Federação de Transportes de Passageiros (Fetranspor) no ano de 2012 com os seguintes dados: número total de passageiros (incluindo número de pagantes, gratuidade e bilhete único), número total de viagens, gasto total de combustível (diesel), idade média da frota de ônibus e quilometragem total percorrida.

Tabela 9 – Base de dados do município do Rio de Janeiro no ano de 2012

Ano	Número total de viagens	Km total percorrida	Número total de passageiros	Consumo total de combustível	Idade média da frota
2012	16.514.136	755.123.683	1.200.401.168	273.669.061	3,35

Fonte: Base de dados Fetranspor

Para o cálculo da emissão de CO₂ foram utilizadas as seguintes formulas:

$$E_{total} = FE \times Q_{Diesel_{total}}$$

$$E_{Km} = \frac{E_{total}}{Km_{total}}$$

$$O_{média} = \frac{Total\ de\ passageiros}{Viagens \times 2}$$

$$E_{Km/Passageiro} = \frac{E_{Km}}{O_{média}}$$

Sendo:

E_{total} = Emissão total de CO₂ no período

FE = Fator de emissão (Kg de CO₂ por litro de diesel)

$Q_{Diesel_{total}}$ = Total de litros de diesel utilizado por toda a frota

E_{Km} = Emissão de CO₂ por km

Km_{total} = Quilometragem total percorrida por toda a frota

$O_{média}$ = Ocupação média dos ônibus

$Total\ de\ passageiros$ = Passageiros pagantes, não pagantes e bilhete único

$Viagens$ = Número total de viagens incluindo todas as linhas

$E_{Km/Passageiro}$ = Emissão de CO₂ por Km e passageiro

O fator de emissão de CO₂ estimado por litro de diesel foi o mesmo utilizado pelo Ministério do Meio Ambiente (2011) de 2,671 Kg/Litro. A Tabela 10 abaixo apresenta o resultado dos cálculos.

Tabela 10 – Cálculo da emissão de CO₂ por km/Passageiro no ano de 2012 cidade do Rio de Janeiro

Mês/Ano	Emissão Total CO ₂	Emissão por Km CO ₂	Ocupação média	Emissão por Km/Passageiro
2012	730.970.061,93	0,97	36,34	0,03

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Para o cálculo das emissões de CO, NMHC, NO_x e MP por Km e passageiro foram utilizadas as seguintes fórmulas:

$$\frac{g_{poluente}}{Km} = \frac{g_{poluente}}{g_{diesel}} \times \frac{g_{diesel}}{L_{diesel}} \div \frac{Km}{L_{diesel}}$$

$$g_{poluente_{Km/Pass}} = \frac{\frac{g_{poluente}}{Km}}{O_{média}}$$

Sendo:

$g_{poluente_{Km/Pass}}$ = quantidade em gramas de poluente por Km e passageiro

Os poluentes foram calculados de acordo com a fase do Proconve. Os valores de Km por litro de diesel e gramas de poluente por Km foram calculados pelo autor com base nos dados da Fetranspor. O resultado pode ser visto nas tabelas 11, 12, 13 e 14.

Tabela 11 – Fator de emissão de CO para motores Diesel, em g_{CO}/Km

Fase Proconve	$\frac{g_{CO}}{Km}$	$\frac{g_{CO}^1}{Kg_{diesel}}$	$\frac{g_{diesel}^1}{L_{diesel}}$	$\frac{Km}{L_{diesel}}$
Pré-Proconve, P1 e P2	2,556	8,267	0,853	2,759
P3	2,297	7,431	0,853	2,759
P4	1,251	4,048	0,853	2,759
P5	1,166	3,773	0,853	2,759
P7	1,222	3,952	0,853	2,759

¹ Com base nos dados do MMA (2011)

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Tabela 12 – Fator de emissão de NMHC para motores Diesel, em g_{NMHC}/Km

Fase Proconve	$\frac{g_{NMHC}}{Km}$	$\frac{g_{NMHC}}{Kg_{diesel}}$	$\frac{g_{diesel}}{l_{diesel}}$	$\frac{Km}{l_{diesel}}$
Pré-Proconve, P1 e P2	0,934	3,022	0,853	2,759
P3	0,766	2,477	0,853	2,759
P4	0,427	1,381	0,853	2,759
P5	0,225	0,727	0,853	2,759
P7	0,236	0,762	0,853	2,759

¹ Com base nos dados do MMA (2011)

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Tabela 13 – Fator de emissão de NO_x para motores Diesel, em g_{NO_x}/Km

Fase Proconve	$\frac{g_{NO_x}}{Km}$	$\frac{g_{NO_x}}{Kg_{diesel}}$	$\frac{g_{diesel}}{l_{diesel}}$	$\frac{Km}{l_{diesel}}$
Pré-Proconve, P1 e P2	14,701	47,556	0,853	2,759
P3	9,288	30,046	0,853	2,759
P4	9,068	29,333	0,853	2,759
P5	6,562	21,227	0,853	2,759
P7	2,650	8,571	0,853	2,759

¹ Dados retirados de MMA (2011)

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Tabela 14 – Fator de emissão de MP para motores Diesel, em g_{MP}/Km

Fase Proconve	$\frac{g_{MP}}{Km}$	$\frac{g_{MP}}{Kg_{diesel}}$	$\frac{g_{diesel}}{l_{diesel}}$	$\frac{Km}{l_{diesel}}$
Pré-Proconve, P1 e P2	0,907	2,933	0,853	2,759
P3	0,451	1,459	0,853	2,759
P4	0,177	0,571	0,853	2,759
P5	0,110	0,355	0,853	2,759
P7	0,026	0,086	0,853	2,759

¹ Dados retirados de MMA (2011)

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Os resultados de cada grama de poluente por Km foram então divididos pela ocupação média (36,36 passageiros por km) para se obter a quantidade de gramas de poluente por Km e passageiro.

Tabela 15 – Fator de emissão por Km e passageiro

Fase Proconve	CO	NMHC	NO_x	MP
Pré-Proconve, P1 e P2	0,070	0,026	0,404	0,025
P3	0,063	0,021	0,255	0,012
P4	0,034	0,012	0,249	0,005
P5	0,032	0,006	0,180	0,003
P7	0,034	0,006	0,073	0,001

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Com o intuito de se obter um fator único de emissão de poluentes e visando aproximar o máximo da emissão real da cidade do Rio de Janeiro, foi feita uma média das emissões calculada a partir da porcentagem da frota de ônibus de acordo com a fase do Proconve.

Tabela 16 – Perfil da frota da cidade do Rio de Janeiro

Ano de fabricação	Fase proconve	Porcentagem
1989-1995	Pré-Proconve, P1 e P2	0,20%
1996-1999	P3	0,60%
2000-2005	P4	6,60%
2006-2011	P5	74,90%
2012 em diante	P7	17,70%

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Visando comparar as emissões de poluentes com outros modais por km/passageiro, os fatores de emissão de automóveis (incluindo comerciais leves do ciclo otto) e motocicletas (MMA, 2011) foram divididos pela ocupação média de 1,5 e 1 respectivamente. Os dados se encontram na tabela 17 abaixo.

Tabela 17 – Comparativo dos fatores de emissão de poluentes dos automóveis, motocicletas e ônibus urbanos por Km e passageiro.

Poluentes		Monóxido de carbono (CO)	Óxidos de nitrogênio (NOx)	Material particulado (MP)	Aldeídos (RCHO)	NM HC	Metano (CH ₄)
Automóveis e comerciais leves do ciclo Otto	Gasolina C	0,2000	0,0133	0,0007	0,0011	0,0227	0,0073
	Flex - Gasolina C	0,2200	0,0200	0,0007	0,0016	0,0213	0,0073
	Flex - Etanol hidratado	0,3733	0,0213	-	0,0069	0,0200	0,0073
Motocicletas	Gasolina C	1,0200	0,1000	0,0035	-	0,1400	0,0300
Ônibus Urbano	Diesel	0,0328	0,1669	0,0028	-	0,0067	-

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Ao comparar a emissão de poluentes (por Km e passageiro) com outros modais, pode se chegar a algumas conclusões. No tangente as emissões de CO, a motocicleta é o modal que mais emite por Km e passageiro e ônibus o menos poluidor. Para a emissão de NOx, os ônibus estão no topo da lista de maior emissor e os carros os menos poluidores. As motocicletas também se enquadram como o modal mais poluidor de material particulado, e os automóveis, independente do combustível, são os menos poluidores. Já sob a ótica da emissão do NMHC, nota-se que os ônibus são os menos poluidores e que novamente as motocicletas são os principais emissores deste poluente. Não foi possível comparar a emissão de RCHO e de metano entre os modais visto que não existem dados disponíveis para os ônibus urbanos. Para a emissão de CO₂ temos que os automóveis, motocicletas (conforme apresentado por Carvalho (2011)) e os ônibus emitem 0,1268, 0,07 e 0,03kg de CO₂ por Km/Passageiro respectivamente.

Em linhas gerais, é possível concluir que de todos os modais as motocicletas são os mais poluidores de praticamente todos os poluentes avaliados (com exceção do CO₂). Em segundo lugar temos os carros que emitem mais CO,

CO₂ e NMHC do que os ônibus. E por último, como o menos poluidor nos quesitos analisados, temos os ônibus. Desta forma, considerando todos os poluentes os ônibus se tornam o modal mais eficiente em termos de quantidade de poluente emitido por km e passageiro.

4

Inventário de emissões do setor de transportes urbanos da região metropolitana do Rio de Janeiro 2013

Para realizar o inventário de emissões primeiramente foi considerado um universo maior abrangendo toda a região metropolitana do Rio de Janeiro ao invés de somente a cidade do Rio de Janeiro como dito anteriormente. Este fato se deve principalmente devido ao maior frota (cerca de 8 mil ônibus da cidade do Rio de Janeiro comparados com 18 mil da região metropolitana) já que a região metropolitana abrange mais municípios e também pelo fato de várias delas servirem como cidades dormitório e pela expansão de novos empreendimentos para outros municípios (como é o caso do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro no município de Itaboraí que passou a exigir um grande fluxo de pessoas) para a cidade do Rio de Janeiro.



Gráfico 1 – Região metropolitana do Rio de Janeiro

Para o cálculo da emissão de poluentes foi inicialmente necessário dividir os ônibus por tipo e por ano de fabricação.

Para se obter o número de veículos pela fase do Proconve, foi utilizado o ano de fabricação de cada um. Os dados compilados e com isso foi possível realizar uma estimativa das emissões.

Com base na tabela 7, pelo qual estima o fator de emissão por fase do proconve e estimando que os ônibus articulados (P7) possuem uma potência média 62,5% maior que um ônibus convencional, foram consideradas que as emissões dos articulados são maiores que um ônibus convencional na fase P5 e P7 do proconve nesta mesma proporção, conforme Tabela 18 abaixo.

Tabela 18 – Estimativa de emissão dos ônibus articulados nas fases P5 e P7

	CO (g/ km)	HC (g/ km)	NOX (g/ km)	MP (g/ km)
P5 (artic.)	2,26	0,44	12,74	0,21
P7 (artic.)	2,37	0,46	5,15	0,05

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Considerando a estimativa média de consumo quilômetros por litro de diesel e média de distância percorrida em quilômetros por mês, foram estimadas as quantidades de litros de diesel por ano consumidos por cada tipo de ônibus, conforme Tabela 19 abaixo.

Tabela 19 – Estimativas de consumo para ônibus Urbanos, Articulados e Rodoviários no ano de 2013

	Consumo (Km/l)	Km/ mês	litros/ ano
Média Ônibus Urbanos	2,90	6.910,54	28.595,34
Média Ônibus Articulados	1,73	12.808,91	89.105,46
Média Ônibus Rodoviários	3,28	8.677,29	31.746,18

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Para se obter a quantidade de poluentes emitidos por mês, por fase do Proconve e por tipo de ônibus, multiplicou-se os fatores de emissão de cada poluente pela quilometragem média percorrida, os resultados podem ser vistos na Tabela 20.

Tabela 20 – Fatores de emissão de poluentes multiplicados pela quilometragem média mensal percorrida por tipo de ônibus

	FASE PROCONVE	CO	HC	NOX	MP
URBANO	P1	21.146,25	7.739,80	121.418,19	7.491,03
	P2	21.146,25	7.739,80	121.418,19	7.491,03
	P3	19.003,99	6.357,70	76.706,99	3.724,78
	P4	10.365,81	3.524,38	74.910,25	1.458,12
	P5	9.605,65	1.865,85	54.178,63	905,28
	P7	10.089,39	1.934,95	21.906,41	221,14
		CO	HC	NOX	MP
RODOVIÁRIO	P1	20.170,26	7.375,70	115.755,05	7.141,41
	P2	20.170,26	7.375,70	115.755,05	7.141,41
	P3	18.048,76	5.987,33	73.149,55	3.549,01
	P4	9.875,99	3.384,14	71.414,10	1.388,37
	P5	9.205,27	1.735,46	51.629,88	859,05
	P7	9.643,62	1.822,23	20.825,50	208,25
		CO	HC	NOX	MP
ARTICULADO	P5	28.932,13	5.619,91	163.185,51	2.726,70
	P7	30.389,14	5.828,05	65.981,90	666,06

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Para se obter a quantidade de total de poluentes de toda a frota, multiplicou-se a frota pela quantidade de veículos pela Tabela 21 acima, que estimou a quantidade de poluentes emitidos por veículo e por mês.

Tabela 21 – Quantidade de poluentes emitidos para toda a frota da região metropolitana do Rio de Janeiro por tipo e fase do Proconve

	FASE PROCONVE	CO	HC	NOX	MP
URBANO	P1	0,00	0,00	0,00	0,00
	P2	148.023,77	54.178,63	849.927,31	52.437,18
	P3	437.091,66	146.227,03	1.764.260,86	85.669,96
	P4	8.520.695,82	2.897.036,5 8	61.576.228,4 6	1.198.577,8 8
	P5	119.638.378, 22	23.239.109, 44	674.794.881, 49	11.275.271, 62
	P7	35.201.876,1 3	6.751.044,7 4	76.431.470,7 7	771.547,97
		CO	HC	NOX	MP
RODOVIÁRIO	P1	0,00	0,00	0,00	0,00
	P2	0,00	0,00	0,00	0,00
	P3	90.243,82	29.936,65	365.747,77	17.745,06
	P4	2.004.826,29	686.981,05	14.497.061,6 3	281.838,38
	P5	7.953.352,49	1.499.435,7 1	44.608.212,4 3	742.220,68
	P7	1.060.797,68	200.445,40	2.290.804,56	22.908,05
		CO	HC	NOX	MP
ARTICULADO	P5	106,16	20,62	598,78	10,01
	P7	111,51	21,39	242,11	2,44

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Desta forma, somando todos os tipos de ônibus (Urbano, Rodoviário e Articulado), obtemos a quantidade total de poluentes emitidos conforme a Tabela 22 abaixo.

Tabela 22 – Quantidade total de poluentes em toneladas /ano em 2013 por fase do proconve

FASE DO PROCONVE	CO	HC	NOX	MP
P1	0,00	0,00	0,00	0,00
P2	1,78	0,65	10,20	0,63
P3	6,33	2,11	25,56	1,24
P4	126,31	43,01	912,88	17,76
P5	1531,10	296,86	8632,84	144,21
P7	435,15	83,42	944,67	9,53
TOTAL	2.100,67	426,05	10.526,15	173,38

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Para o cálculo da emissão total de CO₂, estimou-se o consumo total de litros de combustível e multiplicou-se pela frota total e pelo fator de emissão de 2,671 kg por litro de diesel queimado.

Tabela 23 – Emissão total de CO₂ na região metropolitana do Rio de Janeiro em 2013

Litros consumidos ano 2013	Toneladas de CO2/ ano
630.445.799,53	1.683.920,73

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

4.1

Frota de ônibus na região metropolitana do Rio de Janeiro: Série histórica, modelo e projeção

O objetivo do presente capítulo é, em última instância, elaborar uma projeção das emissões poluentes para os próximos 2 anos no setor de transportes na região metropolitana do Rio de Janeiro.

Para tal, inicialmente será analisada a série histórica da frota na região metropolitana do Rio de Janeiro no sentido de encontrar um algum comportamento histórico, ou padrão, que possa ser usado para trazer robustez à

projeção que pretende-se fazer. Num segundo momento, serão propostos e avaliados diferentes modelos de séries temporais para a evolução da frota. A escolha pelo modelo ideal será feita a partir do Critério de Informação de Akaike - AIC (*Akaike Information Criterion*). Por fim, a partir dos dados previamente encontrados serão projetadas as emissões no período de 2014 e 2015 na região metropolitana do Rio de Janeiro.

Para a estimativa utilizou-se a base de dados do anuário de frota disponibilizado pelo Departamento Nacional de Trânsito - DENATRAN. Os dados utilizados são mensais e o escopo considerado neste estudo vai de janeiro de 2003 a março de 2014, perfazendo mais de 11 anos de dados e um total de 135 observações.

Como ponto de partida para a análise dos dados, destaca-se um conceito fundamental na análise de séries temporais de estacionariedade. Essencialmente, a estacionariedade é uma característica imprescindível de uma série temporal para que a mesma seja utilizada para fins de previsão. “(...) diz-se que um processo estocástico é estacionário se sua média e variância forem constantes ao longo do tempo e o valor da covariância entre dois períodos de tempo for depender apenas da distância ou defasagem entre os dois períodos, e não do período de tempo efetivo em que a covariância é calculada.” (GUJARATI, 2000 p.719).

Mais formalmente, considerando uma série temporal (Z_t), defasagens (*lags*) de tempo k e m , $\mu(t)$ e σ^2 respectivamente a média e variância da série temporal Z_t , então, a série será estacionária se atender às seguintes condições¹:

$$E[Z_t] = E[Z_{t+k}] = \mu(t), \forall t$$

$$E[(Z_t - \mu)^2] = \sigma^2, \sigma^2 < \infty, \forall t$$

$$COV[Z_t, Z_{t+k}] = COV[Z_t, Z_{t+k+m}], \forall m$$

A inspeção visual da série histórica pode fornecer alguns *insights* sobre o perfil e a eventual estacionariedade da mesma. Adicionalmente, uma componente

¹ Ver SOUZA (1996, p.24) para uma discussão sobre tipos de estacionariedade (i) processos estocásticos estritamente estacionários, (ii) processos estocásticos estritamente estacionários de ordem finita ou (iii) processos estocásticos estritamente estacionários em sentido lato. Nesta dissertação, por premissa, foi utilizada a última definição.

que pode ser detectada é a eventual sazonalidade da série de dados. O Gráfico 2 plota cada ano da série de dados e sinaliza a tendência de crescimento e a aparente ausência de um padrão sazonal na série de dados.

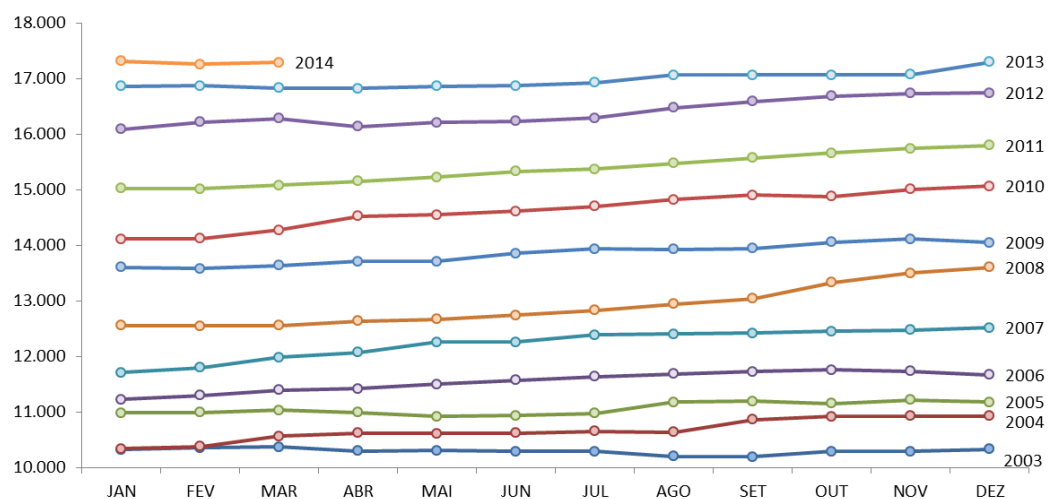


Gráfico 2 – Série histórica mensal da frota de ônibus da região metropolitana do Rio de Janeiro dividida por ano

Fonte: Gráfico elaborado pelo autor com base nos dados do DENATRAN

Um recurso comumente utilizado para avaliar a estacionariedade da série é *fatiar* a série em períodos menores e avaliar como se comportam a média e variância e média da série em cada *pequeno pedaço* de tal série. Desta forma, caso na série como um todo, os valores se mantiverem constantes, então, esse é um indício de estacionariedade. Para tanto, foi feita a separação da série em períodos anuais e avaliados o comportamento de suas estatísticas. Além de evidenciar a tendência de crescimento (média crescente), o Gráfico 3, destaca a volatilidade da série variando em cada ano, indicando, mais uma vez a ausência de estacionariedade.

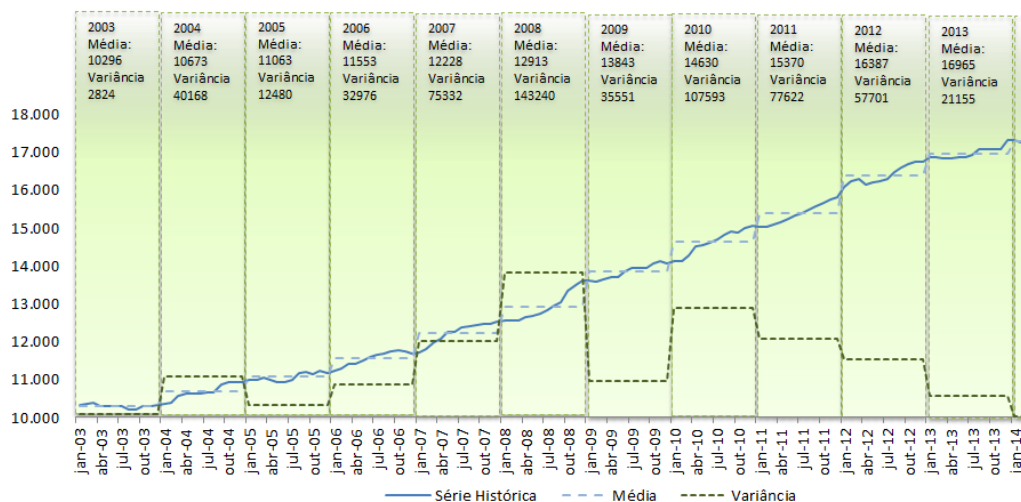


Gráfico 3 – Média e Variância por período da série histórica mensal da frota de ônibus na região metropolitana do Rio de Janeiro

Fonte: Gráfico elaborado pelo autor

Uma outra forma, um pouco mais formal, de avaliar a estacionariedade da série é através da chamada Função de Autocorrelação - FAC (GUJARATI, 2000 p. 721). A FAC amostral de uma determinada série, na defasagem (*lag*) de tempo *k* é definida como:

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} = \frac{\text{Covariância na defasagem } k}{\text{variância}}, \quad -1 \leq \rho_k \leq +1$$

Sendo a covariância e a variância ambas medidas na mesma unidade de medida, a FAC é um número puro situado entre -1 e +1². A representação gráfica das autocorrelações (ρ_k) nas defasagens (*k*) é chamada de correlograma amostral. A partir da análise do correlograma a série pode ser considerada como não-estacionária quando há padrão de decaimento lento para zero nas defasagens *k*. Se uma série temporal for puramente aleatória³, demonstra-se que o coeficientes de autocorrelação amostral são aproximadamente distribuídos com média zero e

² Nesta dissertação estamos usando o conceito de FAC amostral uma vez que temos apenas uma realização de um processo estocástico, isto é, um possível realização de um processo estocástico.

³ Ruído Branco ou *random walk*. As propriedades de um ruído branco são: ter média zero, variância constante e não ser auto-correlacionado.

variância igual $1/n$ onde n é o tamanho da amostra⁴. No caso da presente dissertação tem-se que a, $n= 135$, implicando:

$$\text{Intervalo de Confiança}_{95\%} = \pm 1,96(1/\sqrt{135}) = \pm 0,169$$

A Figura 1 reflete o correlograma amostral da série histórica de frota de ônibus da região metropolitana do Rio de Janeiro. Percebe-se, visivelmente como o decaimento lento da FAC sinaliza a não-estacionariedade da série. Além disso, todos os coeficientes ρ_k , até a defasagem 38 são, individualmente, estatisticamente diferentes de zero. Apenas a partir da defasagem 39 os valores da FAC estatisticamente se anulam.

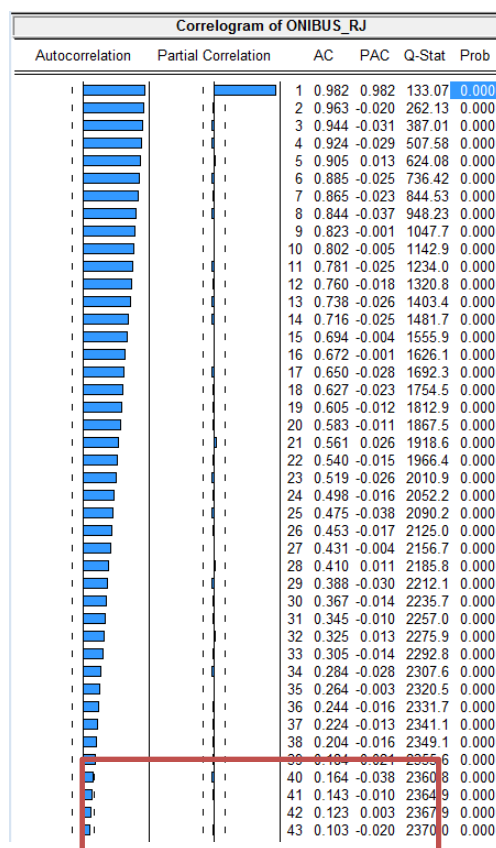


Figura 1 – Correlograma da série histórica mensal da frota de ônibus da região metropolitana do Rio de Janeiro

Fonte: Figura elaborado pelo autor

⁴ Ver BARTLETT (1946), p.27-41.

Uma possível interpretação é a de que, em certa medida, alguma informação histórica de determinada defasagem k é relevante para o valor corrente da série temporal, isto é, o correlograma evidencia algum padrão de dependência temporal da série de dados.

Um teste final para avaliar a estacionariedade da série temporal é o teste da raiz unitária, também conhecido como Teste de Dickey-Fuller Aumentado - ADF (GUJARATI, 2000 p.723-728). Sendo, u_t o termo de erro estocástico, com média zero, variância constante e não auto-correlacionado (ruído branco), t , o termo de tendência (ou tempo) e $\Delta Z_t = Z_t - Z_{t-1}$, existem três possibilidades na realização de um teste ADF, sendo aplicado a regressões nas seguintes formas:

$$\Delta Z_t = \delta Z_{t-1} + u_t \quad eq(a)$$

$$\Delta Z_t = \beta_1 + \delta Z_{t-1} + u_t \quad eq(b)$$

$$\Delta Z_t = \beta_1 + \beta_2 t + \delta Z_{t-1} + u_t \quad eq(c)$$

A hipótese nula testada no teste ADF é:

H_0 (hipótese nula): *Presença de raiz unitária ($\delta = 0$); Não estacionária*

Assim, se no primeiro caso eq (a) a hipótese nula for rejeitada tem-se que a série é estacionária com média zero. No segundo caso eq (b) a rejeição da hipótese nula implica que Z_t é estacionária com média diferente de zero e, por fim, no terceiro caso eq (c), a rejeição de H_0 implica na estacionariedade em torno da tendência determinística (t). A Tabela 24 abaixo resume os resultados do primeiro teste (sem termo constante e sem termo de tendência).

Tabela 24 – Resultados do Teste de Dickey- Fuller de Raiz Unitária

Augmented Dickey-Fuller Unit Root Test on ONIBUS_RJ				
ADF Test Statistic	8.519762	1% Critical Value*	-2.5810	
		5% Critical Value	-1.9423	
		10% Critical Value	-1.6170	
*MacKinnon critical values for rejection of hypothesis of a unit root.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation				
Dependent Variable: D(ONIBUS_RJ)				
Method: Least Squares				
Date: 05/16/14 Time: 16:14				
Sample(adjusted): 2003:02 2014:03				
Included observations: 134 after adjusting endpoints				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
ONIBUS_RJ(-1)	0.003902	0.000458	8.519762	0.0000
R-squared	0.016257	Mean dependent var		51.94776
Adjusted R-squared	0.016257	S.D. dependent var		72.26500
S.E. of regression	71.67517	Akaike info criterion		11.38960
Sum squared resid	683265.0	Schwarz criterion		11.41123
Log likelihood	-762.1032	Durbin-Watson stat		1.631663

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Como pode ser visto, nem mesmo ao nível de significância de 10% não podemos rejeitar a hipótese nula evidenciando a não-estacionariedade da série, em outras palavras, a hipótese H_0 de que a série é estacionaria não pode ser aceita visto que mesmo valores altos de significância (em média aceitável até 5%) o teste indica que a série é não estacionaria. A Tabela 25 resume os resultados do segundo teste (com termo constante e sem termo de tendência).

Tabela 25 – Resultados do Teste de Dickey Fuller com termo constante

Augmented Dickey-Fuller Unit Root Test on ONIBUS_RJ				
ADF Test Statistic	1.477837	1% Critical Value*	-3.4800	
		5% Critical Value	-2.8830	
		10% Critical Value	-2.5781	
*MacKinnon critical values for rejection of hypothesis of a unit root.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation				
Dependent Variable: D(ONIBUS_RJ)				
Method: Least Squares				
Date: 05/16/14 Time: 16:16				
Sample(adjusted): 2003:02 2014:03				
Included observations: 134 after adjusting endpoints				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
ONIBUS_RJ(-1)	0.004038	0.002732	1.477837	0.1418
C	-1.855238	36.93329	-0.050232	0.9600
R-squared	0.016276	Mean dependent var		51.94776
Adjusted R-squared	0.008824	S.D. dependent var		72.26500
S.E. of regression	71.94547	Akaike info criterion		11.40451
Sum squared resid	683251.9	Schwarz criterion		11.44776
Log likelihood	-762.1020	F-statistic		2.184002
Durbin-Watson stat	1.631916	Prob(F-statistic)		0.141834

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

A estatística do teste ADF, neste segundo caso, apresenta um valor menor do que no caso anterior mas, ainda assim, não é capaz de rejeitar, nem mesmo ao nível de significância de 10%, a hipótese nula evidenciando mais uma vez a não-estacionariedade da série também ao considerar o termo constante. Por fim, a

Tabela 26 resume os resultados do último teste (com termo constante e também com termo de tendência).

Tabela 26 – Resultados do Teste de Dickey Fuller com termo constante e de tendência

Augmented Dickey-Fuller Unit Root Test on ONIBUS_RJ				
ADF Test Statistic	-3.050436	1% Critical Value*	-4.0288	
		5% Critical Value	-3.4437	
		10% Critical Value	-3.1464	
*MacKinnon critical values for rejection of hypothesis of a unit root.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation				
Dependent Variable: D(ONIBUS_RJ)				
Method: Least Squares				
Date: 05/16/14 Time: 16:17				
Sample(adjusted): 2003:02 2014:03				
Included observations: 134 after adjusting endpoints				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
ONIBUS_RJ(-1)	-0.061256	0.020081	-3.050436	0.0028
C	606.7573	188.9504	3.211199	0.0017
@TREND(2003:01)	3.873461	1.180973	3.279890	0.0013
R-squared	0.090929	Mean dependent var		51.94776
Adjusted R-squared	0.077050	S.D. dependent var		72.26500
S.E. of regression	69.42520	Akaike info criterion		11.34051
Sum squared resid	631401.4	Schwarz criterion		11.40539
Log likelihood	-756.8142	F-statistic		6.551564
Durbin-Watson stat	1.655280	Prob(F-statistic)		0.001942

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Neste último teste, a estatística ADF, é bem inferior aos casos anteriores situando-se muito próxima ao limites críticos de MacKinnon para rejeição da hipótese nula. Apesar disso, com a estatística obtida não é possível rejeitar, nem mesmo ao nível de significância de 10%, a hipótese nula evidenciando a não-estacionariedade da série mesmo considerando o termo constante e o termo de tendência.

Uma vez confirmada a não-estacionariedade da série temporal e também evidenciada a presença do componente de *tendência* na mesma, um recurso que é comumente utilizado em estatística é realizar determinadas transformações nos dados originais de modo a obter a estacionariedade da mesma. Essencialmente, pretende-se com isso estabilizar a variância e conseguir a normalidade da série (SOUZA, 1996 p. 133). No presente trabalho iremos retirar a tendência da série, tomando a primeira diferença da mesma⁵. Assim, temos:

$$\Delta Z_t = Z_t - Z_{t-1}$$

⁵ Tal recurso é muito comum, principalmente em séries financeiras. Ao tomar a primeira diferença da série história dos preços de fechamento das ações negociadas na Bovespa tem-se os retornos diários que, normalmente são mais simples de serem modelados.

A Figura 2 ilustra o perfil da série original em contraste com a série sem tendência, decorrente da aplicação da equação acima.

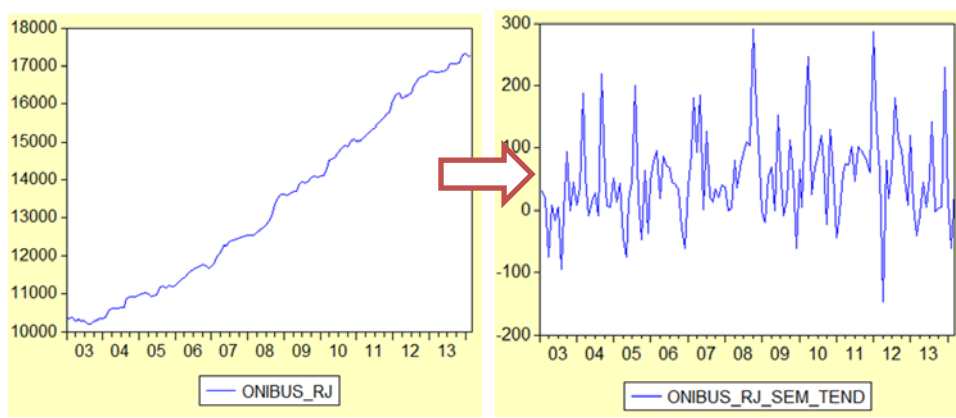


Figura 2 – Série histórica sem o fator de tendência

Fonte: Figura elaborada pelo autor

Decorrente da remoção do termo de tendência os dados aparentam apresentar um padrão mais semelhante a uma normal, conforme evidenciado pelo histograma na Figura 3.

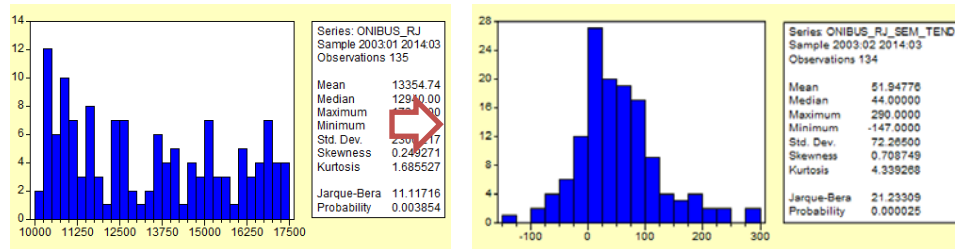


Figura 3 – Histograma da série histórica sem o fator de tendência

Fonte: Figura elaborada pelo autor

Considerando os dados amostrais de média $\mu=52$ e $\sigma=72$, diversos testes de normalidade (sob a hipótese nula de presença normalidade) foram realizados e o alto p-valor encontrado evidencia a normalidade na série de primeiras diferenças conforme ilustrado na Tabela 27 abaixo.

Tabela 27 – Resultados do teste de normalidade

Empirical Distribution Test for ONIBUS_RJ_SEM_TEND
Hypothesis: Normal
Date: 05/29/14 Time: 15:34
Sample(adjusted): 2003:02 2014:03
Included observations: 134 after adjusting endpoints

Method	Value	Adj. Value	Probability
Kolmogorov (D+)	0.085174	0.996985	0.1370
Kolmogorov (D-)	0.075185	0.880071	0.2124
Kolmogorov (D)	0.085174	0.996985	0.2732
Kuiper (V)	0.160359	1.884469	0.0217
Cramer-von Mises (W2)	0.250971	0.249870	0.1872
Watson (U2)	0.211800	0.212320	0.0303
Anderson-Darling (A2)	1.569290	1.569290	0.1608

Parameter	Value	Std. Error	z-Statistic	Prob.
MU	52.00000	*	NA	NA
SIGMA	72.00000	*	NA	NA
Log likelihood	-763.2015	Mean dependent var.		51.94776
No. of Coefficients	0	S.D. dependent var.		72.26500

* Fixed parameter value

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Dando continuidade, realizou-se os testes de raiz unitária na série de diferenciada para avaliar a estacionariedade da mesma. Novamente serão realizados os três testes, sendo: (i) sem termo constante e sem termo de tendência (equação a); (i) com termo de constante mas sem tendência (equação b) e, por fim, com termo constante e com tendência (equação c).

A Tabela 28 resume os resultados do primeiro teste (sem termo constante e sem termo de tendência) na série diferenciada.

Tabela 28 – Resultados do Teste de Dickey Fuller de Raiz Unitária para série sem tendência

Augmented Dickey-Fuller Unit Root Test on ONIBUS_RJ_SEM_TEND			
ADF Test Statistic	-6.864842	1% Critical Value*	-2.5811
		5% Critical Value	-1.9423
		10% Critical Value	-1.6170

*MacKinnon critical values for rejection of hypothesis of a unit root.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation
Dependent Variable: D(ONIBUS_RJ_SEM_TEND)
Method: Least Squares
Date: 05/27/14 Time: 15:36
Sample(adjusted): 2003:03 2014:03
Included observations: 133 after adjusting endpoints

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
ONIBUS_RJ_SEM_T...	-0.526207	0.076653	-6.864842	0.0000
R-squared	0.263089	Mean dependent var		0.007519
Adjusted R-squared	0.263089	S.D. dependent var		91.72212
S.E. of regression	78.73751	Akaike info criterion		11.57761
Sum squared resid	818346.5	Schwarz criterion		11.59934
Log likelihood	-768.9108	Durbin-Watson stat		2.138371

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Como pode ser visto, mesmo no nível de significância mais restrito (1%) podemos rejeitar a hipótese nula (presença de raiz unitária) evidenciando a estacionariedade da série após a primeira diferenciação. A tabela 29 resume os resultados do segundo teste (com termo constante e sem termo de tendência) na série diferenciada.

Tabela 29 – Resultados do Teste de Dickey Fuller de Raiz Unitária para série sem tendência com o termo constante e sem o termo de tendência

Augmented Dickey-Fuller Unit Root Test on ONIBUS_RJ_SEM_TEND				
ADF Test Statistic	-9.344825	1% Critical Value*	-3.4804	
		5% Critical Value	-2.8832	
		10% Critical Value	-2.5782	
*MacKinnon critical values for rejection of hypothesis of a unit root.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation				
Dependent Variable: D(ONIBUS_RJ_SEM_TEND)				
Method: Least Squares				
Date: 05/27/14 Time: 15:37				
Sample(adjusted): 2003:03 2014:03				
Included observations: 133 after adjusting endpoints				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
ONIBUS_RJ_SEM_T...	-0.799929	0.08560	-9.344825	0.0000
C	41.68200	7.62446	5.466874	0.0000
R-squared	0.399979	Mean dependent var	0.007519	
Adjusted R-squared	0.395399	S.D. dependent var	91.72212	
S.E. of regression	71.31954	Akaike info criterion	11.38714	
Sum squared resid	666328.5	Schwarz criterion	11.43061	
Log likelihood	-755.2449	F-statistic	87.32576	
Durbin-Watson stat	1.981183	Prob(F-statistic)	0.000000	

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

A estatística do teste ADF, neste segundo caso, apresenta um valor menor do que no caso anterior sendo possível rejeitar novamente, mesmo ao nível de significância mais restrito (1%), a hipótese nula evidenciando a estacionariedade da série também ao considerar o termo constante. Por fim, a Tabela 30 resume os resultados do último teste (com termo constante e também com termo de tendência).

Tabela 30 – Resultados do Teste de Dickey Fuller de Raiz Unitária para série sem tendência com o termo constante e o termo de tendência

Augmented Dickey-Fuller Unit Root Test on ONIBUS_RJ_SEM_TEND				
ADF Test Statistic	-9.510714	1% Critical Value*	-4.0293	
		5% Critical Value	-3.4440	
		10% Critical Value	-3.1465	
*MacKinnon critical values for rejection of hypothesis of a unit root.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation				
Dependent Variable: D(ONIBUS_RJ_SEM_TEND)				
Method: Least Squares				
Date: 05/27/14 Time: 15:38				
Sample(adjusted): 2003:03 2014:03				
Included observations: 133 after adjusting endpoints				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
ONIBUS_RJ_SEM_T...	-0.821836	0.086412	-9.510714	0.0000
C	26.12275	12.79399	2.041798	0.0432
@TREND(2003:01)	0.245597	0.162602	1.510416	0.1334
R-squared	0.410327	Mean dependent var	0.007519	
Adjusted R-squared	0.401255	S.D. dependent var	91.72212	
S.E. of regression	70.97328	Akaike info criterion	11.38478	
Sum squared resid	654836.8	Schwarz criterion	11.44998	
Log likelihood	-754.0880	F-statistic	45.23064	
Durbin-Watson stat	1.974305	Prob(F-statistic)	0.000000	

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Este último teste a estatística ADF indica, novamente, a rejeição da hipótese nula, mesmo ao nível de significância de 1%, evidenciando a estacionariedade da série mesmo considerando o termo constante e o termo de tendência.

Desta forma, após tornar a série original estacionária após a primeira diferenciação diz-se que a série de frota é integrada de primeira ordem, indicada por $I(1)$. Uma vez obtida a série estacionária iremos agora selecionar o modelo que mais se adequa para representar a série e fazer sua projeção para períodos futuros.

4.2

Seleção do modelo de previsão: metodologia de Box-Jenkins

Neste trabalho, serão propostos 2 diferentes modelos a serem testados para o ajuste e previsão da série de frota de ônibus da região metropolitana do Rio de Janeiro. Ambos os modelos considerados são modelos $ARIMA^6(p,d,q)$ e a escolha pelo modelo adequado se dará a partir das funções de auto correlação (fac) e funções de autocorrelação parcial estimadas ($facp$) que serão utilizadas para comparar as quantidades teóricas e identificar um possível modelo para os dados

⁶ Modelos Autoregressivos de ordem p, Integrados de ordem d e de média móvel de ordem q.

(GUJARATI, 2000 p.742-752). Por fim, os modelos serão avaliados com base no critério de informação de Akaike – AIC (*Akaike Information Criterion*).

Foram feitos diversos testes sobre a série de frota de ônibus da região metropolitana do Rio de Janeiro para avaliar a estacionariedade da mesma. Como demonstrado, a série apenas se torna estacionária após sua primeira diferenciação. O pressuposto da estacionariedade é fundamental para a metodologia de Box-Jenkins que utilizamos nesta dissertação. Em última instância: “*O objetivo de B-J [Box-Jenkins] é identificar e estimar um modelo estatístico que possa ser interpretado como tendo gerado os dados amostrais. Se esse modelo estimado será usado para previsão, devemos supor que as características desse modelo são constantes no tempo, e particularmente no período futuro. Assim, a razão simples de se necessitar de dados estacionários é que qualquer modelo que é inferido a partir desses dados pode ser interpretado como estacionário ou estável, fornecendo assim uma base válida para a previsão*” (POKORNY, 1987 p.343)

A metodologia do Box-Jenkins é bastante útil para identificar qual o melhor modelo a ser adotado. Assim como descreve Gujarati (2000), este método consiste em quatro etapas sendo elas: Identificação (encontrando os valores adequados de p , d e q), Estimação (estimação dos parâmetros dos termos auto-regressivos e de médias móveis incluídos no modelo), Verificação de diagnóstico (verificação se o modelo escolhido se ajusta aos dados) e Previsão.

4.3

Identificação do modelo

Como visto anteriormente, foi feito o uso do recurso de diferenciar a série original *uma vez* para obter a sua estacionariedade. Na prática isso significa que a série original é *Integrada de ordem 1*, $I(1)$, ou, alternativamente, que a série diferenciada é *Integrada de ordem 0*, $I(0)$. O grau de integração de um modelo *ARIMA* (p,d,q) , é expresso pelo parâmetro d . Portanto, temos que a partir da análise preliminar o modelo considerado é um *ARIMA* $(p,1,q)$, sendo necessário ainda conhecer as ordens (p) e (q) respectivamente da parte autoregressiva e média móvel do modelo. Neste momento é oportuno definir a nova série diferenciada como W_t sendo:

$$W_t = \Delta Z_t = Z_t - Z_{t-1}$$

Onde:

$$W_t \sim ARIMA(p, 0, q)$$

$$Z_t \sim ARIMA(p, 1, q)$$

Na identificação dos parâmetros p e q de um modelo $ARIMA(p, d, q)$, um dos principais recursos é o exame do perfil das funções de autocorrelação e função de autocorrelação parcial. Essencialmente, enquanto a autocorrelação mede a correlação (*dependência temporal*) de um dado com sua defasagem em k períodos, a autocorrelação parcial mede também esta correlação (dependência) entre um dado e sua defasagem em k períodos mas agora controlando-se o efeito das correlações nas defasagens intermediárias (períodos menores que k)⁷. Formalmente, sendo \mathbf{P}_k a matriz de correlações e \mathbf{P}_k^* a matriz de autocorrelações com a última linha substituída pelo vetor de autocorrelações tem-se a função de autocorrelação parcial (ϕ_{kk})

$$\phi_{kk} = \frac{|\mathbf{P}_k^*|}{|\mathbf{P}_k|}$$

Tal que, por exemplo

$$\phi_{11} = \rho_1$$

$$\phi_{22} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & \rho_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 \end{vmatrix}}$$

$$\phi_{33} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 & \rho_2 \\ \rho_2 & \rho_1 & \rho_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 \\ \rho_2 & \rho_1 & 1 \end{vmatrix}}$$

⁷ A dedução das autocorrelações parciais é feita através das equações de Yule Walker e foge ao escopo desta dissertação. O leitor pode consultar, por exemplo, SOUZA (1996) p.65-68 e MORETTIN (2006), p.130-134 para ter referências.

As funções de autocorrelação e autocorrelação parcial obtidas a partir da série diferenciada encontram-se na Figura 4. Pretende-se então identificar se o padrão exibido abaixo se assemelha com o de determinados modelos como AR(1), AR(2), MA(1), MA(2), ARIMA (1,1,1), etc. Cada um destes modelos exibe um padrão típico a ser comparado com o que foi obtido após a diferenciação da série Z_t .

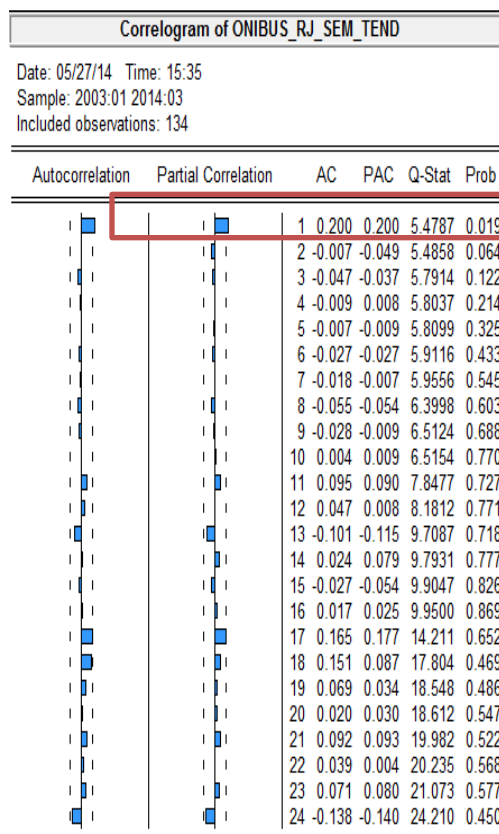


Figura 4 – Correlograma da série histórica da frota de ônibus

Fonte: Figura elaborada pelo autor

O perfil exibido pelas fac e $facp$ da série W_t se assemelha a dois padrões que são destacados na literatura⁸. A Tabela 31 resume o comportamento das fac e $facp$ de um processo $ARIMA(p,d,q)$ e destaca aqueles aos quais os dados obtidos mais se assemelham⁹.

⁸ O detalhamento de tais padrões foge ao escopo deste trabalho. Tais padrões podem ser vistos em Gujarati (2000) p. 748, MORETTIN (2006), p.153, SOUZA (1996), p.68.

⁹“Se o correlograma tem picos nas defasagens 1, 2, ..., q e truncamento após e o correlograma parcial tem picos nas defasagens 1, 2, ..., p e truncamento após, devem ser avaliadas as situações: (i) Se o correlograma trunca-se mais abruptamente, o modelo é MA(q). (ii) Se o correlograma parcial trunca-se mais abruptamente, o modelo é AR(p). (...) Como regra prática, em geral MA(q) leva ao melhor modelo e deve ser tentado em primeiro lugar”.(CAVALCANTI NETTO, 2007).

Tabela 31 – Características do processo ARIMA

Ordem	$(1,d,0)$	$(0,d,1)$
Comportamento de ρ_k	Decai exponencialmente	Somente $\rho_1 \neq 0$
Comportamento de ϕ_{kk}	Somente $\phi_{11} \neq 0$	Decaimento exponencial dominante
Ordem	$(2,d,0)$	$(0,d,2)$
Comportamento de ρ_k	Mistura de exponenciais ou ondas senóides	Somente $\rho_1 \neq 0$ e $\rho_2 \neq 0$
Comportamento de ϕ_{kk}	Somente $\phi_{11} \neq 0$ e $\phi_{22} \neq 0$	Dominada por mistura de exponenciais ou ondas senóides
Ordem	$(1,d,1)$	
Comportamento de ρ_k	Decai exponencialmente após o lag 1	
Comportamento de ϕ_{kk}	Dominada por decaimento exponencial após o lag 1	

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

4.4

Estimativa

Decorrente dos resultados obtidos na seção anterior serão estimados dois modelos, a saber, sendo $ARIMA(0,1,1)$ e $ARIMA(1,1,1)$. Sendo μ e θ , constantes reais e $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$ então o processo $ARIMA(0,1,1)$ é dado por:

$$Z_t = \mu + \varepsilon_t - \theta\varepsilon_{t-1}$$

Por sua vez, sendo ϕ , μ e θ , constantes reais e $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$ então o processo $ARIMA(1,1,1)$ é dado por:

$$Z_t = \phi Z_{t-1} + \mu + \varepsilon_t - \theta\varepsilon_{t-1}$$

A estimativa dos parâmetros de cada modelo pode ser feita através de diversas técnicas como, Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), Estimador de Máxima Verossimilhança (EMV) ou Método dos Momentos (GMM)¹⁰.

A partir da série de dados de frota de ônibus foram estimados os parâmetros do modelo $ARIMA(0,1,1)$, sendo:

$$\mu = 51,9$$

$$\theta = -0,22$$

¹⁰ A estimação passo-a-passo dos parâmetros foge ao escopo desta dissertação. A literatura referenciada na bibliografia apresenta material relevante sobre tal assunto.

$$\varepsilon_{t-1} = 1,8$$

A partir da série de dados de frota de ônibus foram estimados os parâmetros ARIMA (1,1,1):

$$\mu = 51,7$$

$$\sigma = 71,3$$

$$\phi = -0,18$$

$$Z_0 = 32$$

$$\varepsilon_{t-1} = -6,13$$

4.5

Checagem de diagnóstico

A adequabilidade dos modelos será feita a partir da análise dos resíduos do modelo estimado e da comparação entre os índices de informação de Akaike dos modelos.

O correlograma dos resíduos de ambos modelos está plotado abaixo. Por ele vê-se que os resíduos não são correlacionados, representado um *ruído branco*.

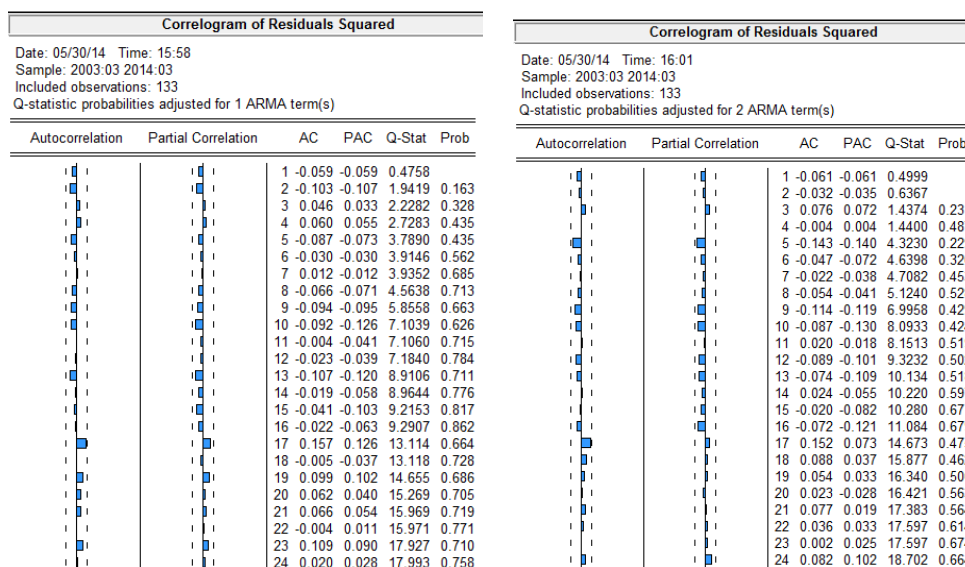


Figura 5 – Correlograma dos resíduos

Fonte: Figura elaborada pelo autor

O critério de informação de *Akaike*¹¹ será usado para comparar ambos os modelos e optar por aquele cujo índice apresentar menor valor. Sendo η o número de parâmetros do modelo e L o valor da que maximiza a função de verossimilhança do modelo, então:

$$AIC = 2\eta - 2 \ln(L)$$

A Tabela 32 evidencia a escolha pelo modelo ARIMA (0,1,1) como sendo aquele que minimiza a *perda de informação* quando o modelo é usado para representar os dados que o geraram.

Tabela 32 – Escolha dos modelos ARIMA

Ordem	AIC
ARIMA (0,1,1)	1520
ARIMA (1,1,1)	1529

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

4.6

Previsão

Uma vez definido o modelo adequado a ser utilizado na projeção da frota de ônibus da região metropolitana do Rio de Janeiro, a previsão do mesmo é feita tomando-se o valor esperado da equação, sendo¹²:

$$E[Z_{t+1}] = \mu$$

A série histórica, a projeção, e os intervalos de confiança de 5% a 95% e 25% a 75% estão no Gráfico 4 abaixo.

¹¹ Alternativamente poderia ter-se usado o BIC *Bayesian Information Criterion*. Os resultados obtidos foram os mesmos tanto fazendo uso do AIC quanto do BIC. No caso do modelo ARIMA (0,1,1) o BIC foi de 1520, inferior ao do modelo ARIMA (1,1,1) de 1541, evidenciando, mais uma vez, ser o modelo ideal para os propósitos desta dissertação.

¹² Como por hipótese $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$, o valor esperado é a própria média μ

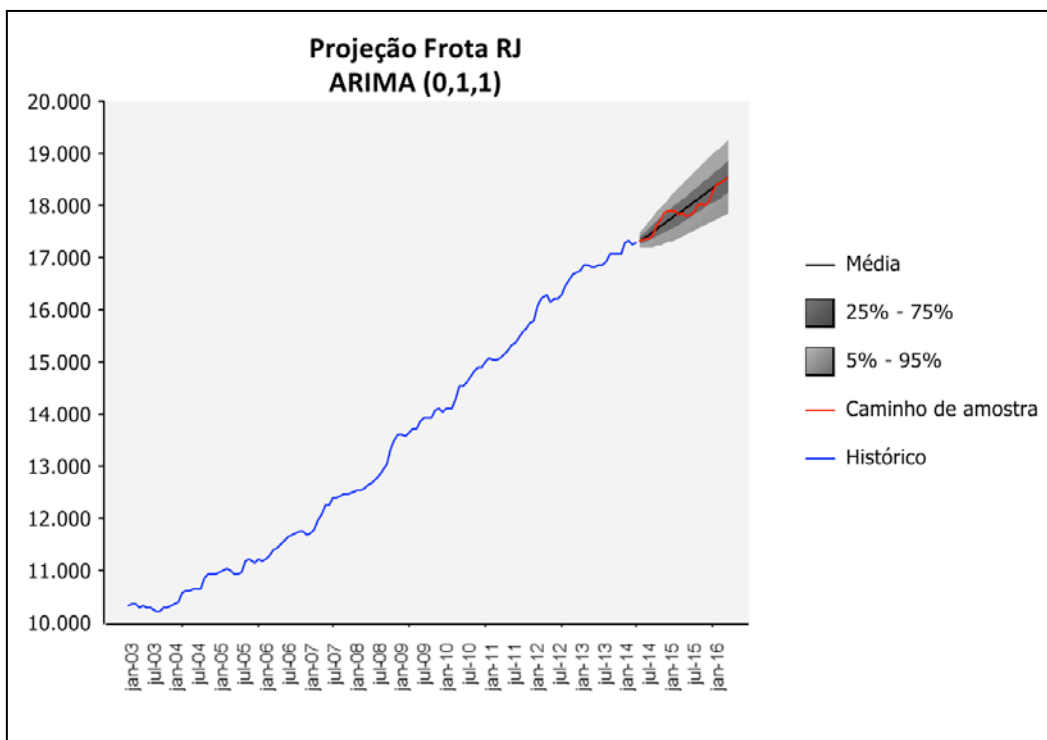


Gráfico 4 – Projeção da série histórica mensal da frota de ônibus na região metropolitana do Rio de Janeiro até 2016

Fonte: Gráfico elaborado pelo autor

O ajuste do modelo aos dados históricos e também os intervalos de confiança estão representados no Gráfico 5. É interessante notar também a curva vermelha que representa uma possível realização do processo estocástico ARIMA (0,1,1)

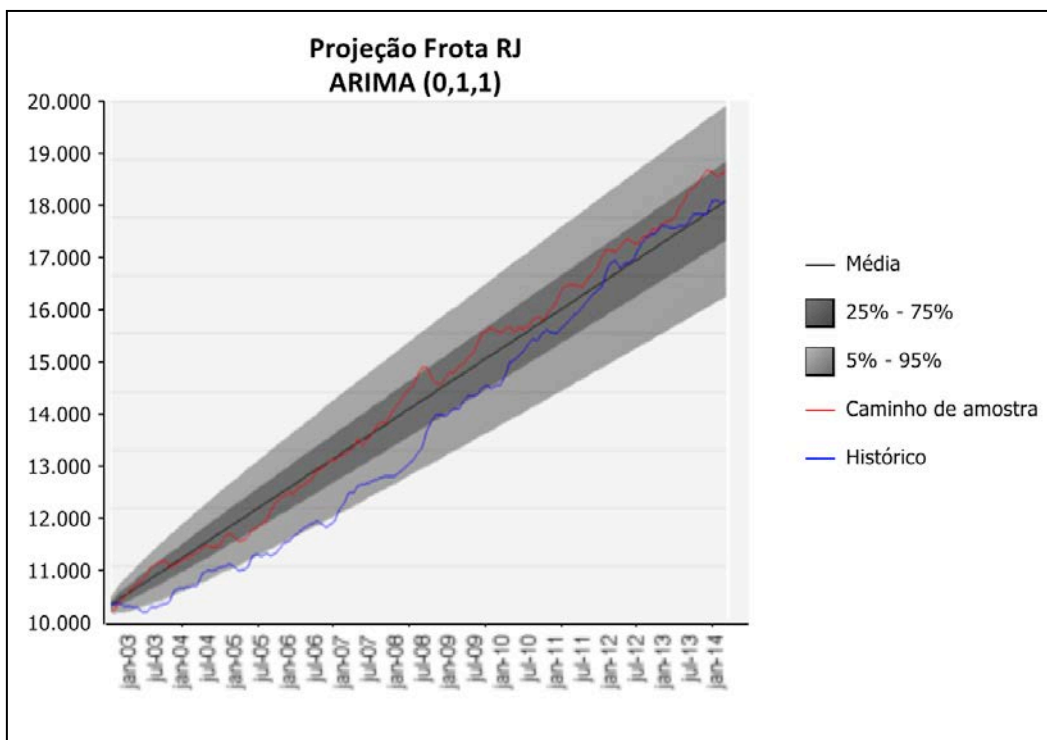


Gráfico 5 – Modelo ARIMA (0,1,1) aplicado à serie histórica mensal da frota de ônibus na região metropolitana do Rio de Janeiro

Fonte: Gráfico elaborado pelo autor

4.7

Estimativa de emissão de poluentes

Para o cálculo da estimativa das emissões de poluentes foi adotada a estimativa pessimista. Para tal, a frota atual permanece constante e somente são acrescentados novos carros P7. Em geral, seria prudente fazer uma estimativa considerando alguns fatores como a taxa média de renovação anual para os carros antigos, a criação de novas tecnologias menos poluentes, a utilização de combustíveis alternativos e a entrada de novos sistemas de mobilidade urbana que permitem reduzir a frota (BRS e BRT), no entanto, como existem muitas incertezas a cerca de como estimar estes fatores, optou-se por manter o cenário constante. Além disso, o setor enfrenta atualmente queda nas vendas de novos ônibus (que podem prolongar a idade média da frota). A vantagem desta premissa seria a simplicidade de cálculo e também a estimativa mais realista visto que para o ano de 2013, a média de idade da frota segundo estimativas é de 3,55 para ônibus urbanos.

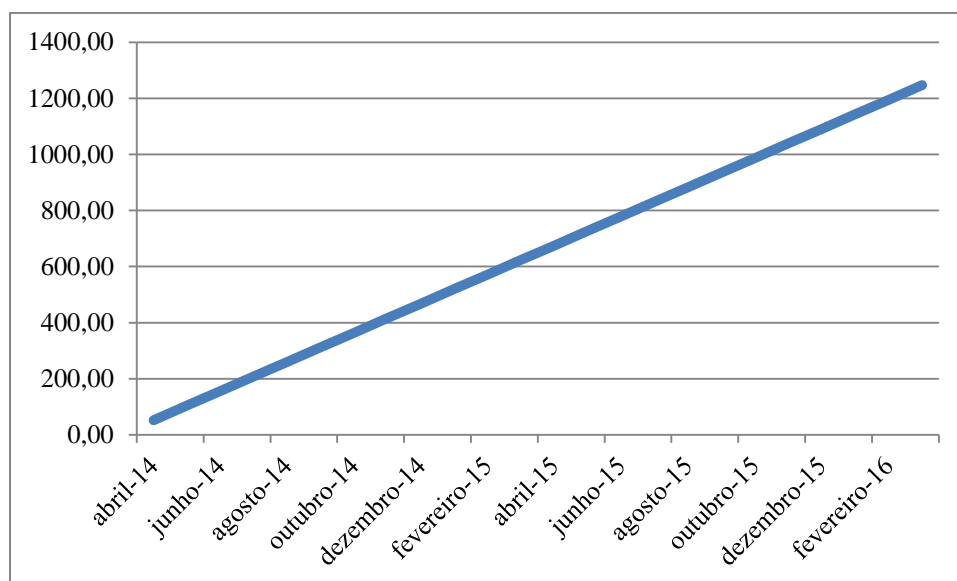


Gráfico 6 – Projeção de aumento acumulado mensal da frota até 2016

Fonte: Gráfico elaborado pelo autor

A Tabela 33 apresenta os resultados consolidados das emissões de poluentes do aumento líquido acumulado da frota. Vale ressaltar que se considerou que todos os novos ônibus possuem a tecnologia P7.

Tabela 33 – Projeção acumulativa do acréscimo do número de ônibus com a respectiva emissão mensal de poluentes

Mês	Acréscimo do número de ônibus	CO (ton)	HC (ton)	NOX (ton)	MP (ton)	CO2 (ton)
abril-14	52,36	0,53	0,10	1,15	0,01	333,23
maio-14	104,31	1,06	0,20	2,29	0,02	663,90
junho-14	156,27	1,58	0,30	3,42	0,03	994,63
julho-14	208,21	2,11	0,40	4,56	0,05	1.325,24
agosto-14	260,16	2,63	0,50	5,70	0,06	1.655,87
setembro-14	312,11	3,16	0,60	6,84	0,07	1.986,51
outubro-14	364,06	3,68	0,70	7,98	0,08	2.317,21
novembro-14	416,01	4,21	0,80	9,11	0,09	2.647,81
dezembro-14	467,96	4,73	0,91	10,25	0,10	2.978,51
janeiro-15	519,91	5,26	1,01	11,39	0,11	3.309,14
fevereiro-15	571,84	5,79	1,11	12,53	0,13	3.639,68
março-15	623,81	6,31	1,21	13,67	0,14	3.970,47
abril-15	675,75	6,84	1,31	14,80	0,15	4.301,03
maio-15	727,71	7,36	1,41	15,94	0,16	4.631,76
junho-15	779,66	7,89	1,51	17,08	0,17	4.962,41

julho-15	831,61	8,41	1,61	18,22	0,18	5.293,07
agosto-15	883,54	8,94	1,71	19,36	0,20	5.623,63
setembro-15	935,50	9,47	1,81	20,49	0,21	5.954,32
outubro-15	987,46	9,99	1,91	21,63	0,22	6.285,04
novembro-15	1039,41	10,52	2,01	22,77	0,23	6.615,68
dezembro-15	1091,35	11,04	2,11	23,91	0,24	6.946,27
janeiro-16	1143,30	11,57	2,21	25,05	0,25	7.276,90
fevereiro-16	1195,23	12,09	2,31	26,18	0,26	7.607,48
março-16	1247,19	12,62	2,41	27,32	0,28	7.938,14

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

Com os resultados acima foi possível prever a quantidade total de emissão de poluentes de toda a frota da região metropolitana para o ano de 2014 e 2015, conforme a Tabela 34.

Tabela 34 – Previsão anual de emissão total de poluentes no setor de transportes urbanos na região metropolitana do Rio de Janeiro para os anos de 2014 e 2015

	CO (ton/ano)	HC (ton/ano)	NOX (ton/ano)	MP (ton/ano)	CO2 (ton/ano)
2013	2.100,67	426,05	10.526,15	173,38	1.683.920,73
2014	2.157,49	436,92	10.649,17	174,62	1.719.662,91
2015	2.233,17	451,39	10.813,04	176,28	1.767.275,92

Fonte: Tabela elaborada pelo autor

4.8

Metodologia alternativa para previsão

De modo a trazer robustez à análise previamente considerada serão apresentados os resultados obtidos ao considerar uma metodologia de previsão alternativa à de Box & Jenkins. As técnicas de amortecimento exponencial foram formuladas inicialmente em BROWN (1956) e HOLT (1957) e podem ser usadas tanto para suavizar séries históricas de dados quanto para fins de projeção.

Dentre os modelos da família de Métodos de Amortecimento Exponencial (MAE), será considerado o modelo de Holt que é adequado para séries que apresentam a componente de tendência e não apresentam sazonalidade conforme visto em MORETTIN (2006).

Seja considerada a série temporal (Z_t) representada pela soma das componentes de nível (μ_t), tendência (T_t) e o resíduo aleatório com média zero e variância constante (e_t), tal que:

$$Z_t = \mu_t + T_t + e_t, \quad t = 1, \dots, N$$

O modelo de Holt tem dois parâmetros: a constante de amortecimento de nível (α) e a constante de amortecimento da tendência (β). Estima-se os valores do nível e da tendência da série no tempo t , por:

$$\bar{Z}_t = \alpha Z_t + (1 - \alpha)(\bar{Z}_{t-1} + \hat{T}_{t-1}), \quad 0 < \alpha < 1 \quad e \quad t = 2, \dots, N$$

$$\hat{T}_t = \beta(\bar{Z}_t - \bar{Z}_{t-1}) + (1 - \beta)(\hat{T}_{t-1}), \quad 0 < \beta < 1 \quad e \quad t = 2, \dots, N$$

A equação de previsão do modelo para o período h , a partir do tempo t , é definida como:

$$\hat{Z}_t(h) = \bar{Z}_t + h\hat{T}_t, \quad \forall h > 0$$

A previsão consiste, portanto, em adicionar ao valor inicial (\bar{Z}_t) a tendência multiplicada pelo número de passos a serem projetados pelo modelo. A cada passo da projeção as equações são atualizadas como:

$$\bar{Z}_{t+1} = \alpha Z_{t+1} + (1 - \alpha)(\bar{Z}_t + \hat{T}_t), \quad 0 < \alpha < 1 \quad e \quad t = 2, \dots, N$$

$$\hat{T}_{t+1} = \beta(\bar{Z}_{t+1} - \bar{Z}_t) + (1 - \beta)(\hat{T}_t), \quad 0 < \beta < 1 \quad e \quad t = 2, \dots, N$$

$$\hat{Z}_{t+1}(h - 1) = \bar{Z}_{t+1} + (h - 1)\hat{T}_{t+1}, \quad \forall h > 0$$

O modelo fornece um intervalo de possíveis projeções para diferentes combinações dos parâmetros (α e β). A escolha pela combinação adequada de parâmetros é feita de forma a escolher o vetor (α e β) que minimiza os erros quadráticos da previsão (*RMSE backforecasting*). Para a série considerada, o par de valores $\alpha=1$ e $\beta=0$, é o mais adequado (*RMSE* mínimo de 72,0 e erro médio percentual – *MAPE* - de 0,41%).

O Gráfico 7 apresenta a série histórica e o intervalo de projeção considerado pelo modelo de Holt e evidencia a projeção que minimiza o RMSE dos dados.

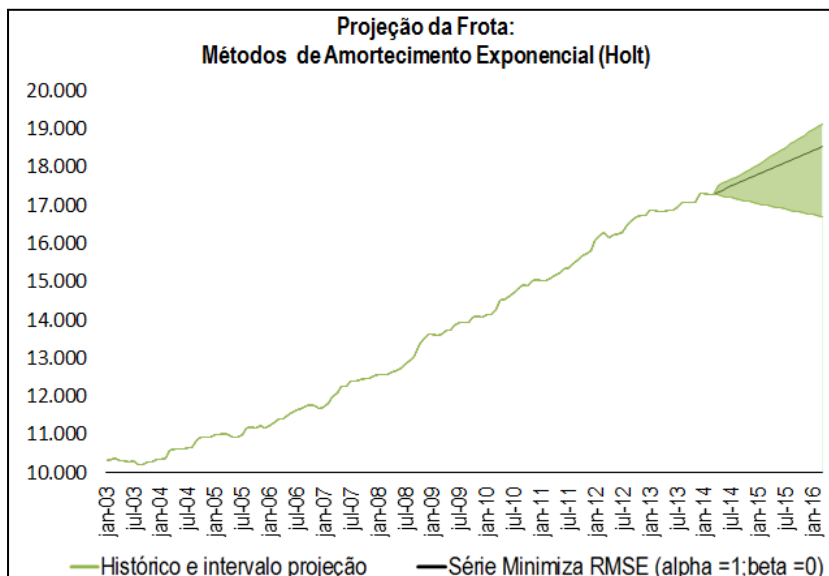


Gráfico 7 – Evolução da frota usando modelo de Holt: Intervalo e série projetada

Fonte: Gráfico elaborado pela autora

Por fim, evidencia-se que a projeção obtida a partir da modelo de Holt exibe perfil estatisticamente idêntico ao da projeção gerada pelo modelo MA (a correlação entre as séries projetadas é superior a 99,9%). O Gráfico 8 ilustra isso.

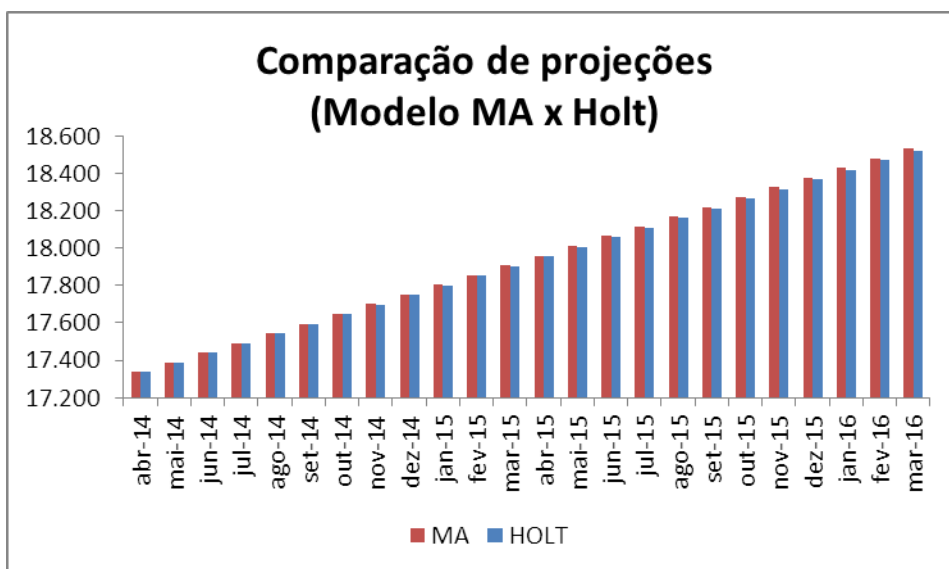


Gráfico 8 – Comparação de projeções usando modelo MA e HOLT

Fonte: Gráfico elaborado pela autora

5

Conclusão

Os modais de transporte possuem diferentes intensidades energéticas, consumo e emissões de poluentes. É importante esclarecer qual o modal mais eficiente por passageiro/quilômetro, de modo que se possa criar incentivos efetivos visando o desenvolvimento sustentável das grandes cidades. Ao comparar os diferentes meios de transporte verificou-se que o transporte rodoviário é o mais intensivo na emissão de poluentes por ter os derivados de petróleo como principal fonte energética. Nesta categoria, nota-se que os veículos leves e motocicletas são os mais intensivos em termos de emissão de CO₂ (Passageiro/Km) e que o ônibus é o modal mais eficiente. Além disso, vale ressaltar que com os incentivos ao consumo de combustíveis alternativos e o avanço da tecnologia do sistema de motorização tende reduzir bastante a emissão de poluentes por unidade de energia são uma alternativa sustentável principalmente no combate ao aquecimento global.

No tangente ao espaço viário, para o mesmo número de passageiros, cada unidade de ônibus é equivalente a 65 carros ou 50 motocicletas. O estímulo ao transporte público coletivo (ônibus e metrô) se torna essencial para a redução da poluição, além de reduzir o uso de veículos particulares e conseqüentemente o congestionamento, melhorando o tráfego na cidade. Desta forma, quanto maior o uso do transporte coletivo, maior o aproveitamento energético por passageiro e quilômetro percorrido.

Estima-se que a emissão anual total de CO₂ proveniente da frota metropolitana de ônibus da cidade do Rio de Janeiro seja de 1.683.920 toneladas no ano de 2013 e podendo chegar a 1.767.275 no ano de 2015 com a estimativa de aumento da frota de ônibus. Em geral, os modelos econométricos de previsão são bem aceitáveis e fazem uma estimativa bastante realista com base em dados passados. O Gráfico 5 abaixo mostra uma estimativa de longo prazo (20 anos) para o aumento de frota na região metropolitana do Rio de Janeiro. Vale ressaltar que quanto maior o período de previsão aumenta-se também a incerteza da estimativa, visto que diversos fatores que podem afetar a frota podem não serem

captados pelo modelo. Nota-se que para este modelo específico o aumento da frota é bastante linear. Isso nos leva a acreditar que tendo em vista a sustentabilidade no setor e que atualmente busca-se a redução de CO₂, é preciso traçar políticas efetivas e buscar meios alternativos de energia menos poluentes.

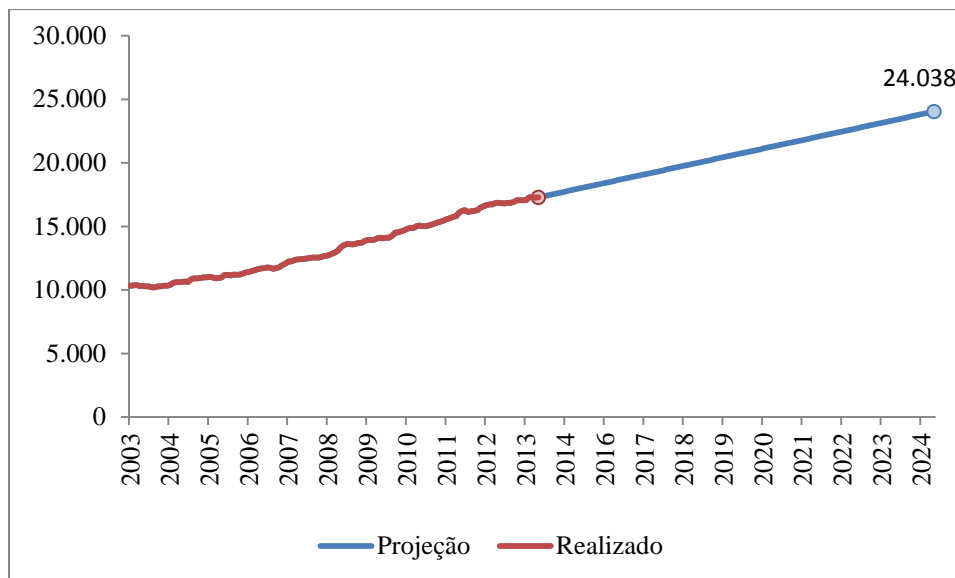


Gráfico 8 – Previsão de aumento da frota de longo prazo

Fonte: Gráfico elaborado pelo autor

No tangente a emissão anual de CO, estima-se que esta seja em torno de 2100 toneladas no ano de 2013 e que pode chegar a 2233 toneladas em 2015. Para a emissão de HC estima-se que este seja em torno de 426 toneladas em 2013 e que pode chegar a 451 em 2015. Para a emissão de NOx estima-se que a emissão deste seja em torno de 10.526 toneladas no ano de 2013 e que pode chegar a 10.813 toneladas em 2015. Finalmente para a emissão de MP, estima-se que este seja em torno de 173 toneladas e que pode chegar a 176 toneladas em 2015.

Vale ressaltar que assim como explica MacDowell (2012), o aumento do número de veículos pode aumentar mais que proporcionalmente a quantidade de emissão de poluentes, visto que este pode ocasionar no aumento do congestionamento das vias e no tempo de permanência do trânsito (aumento do tempo do carro ligado).

De uma forma geral, de acordo com o modelo proposto por Sheiff (1985), o sistema de transporte metropolitano é um conjunto de redes viárias e modais que funcionam em um equilíbrio dinâmico tendendo ao mesmo tempo de viagem.

Assim, ao aumentar ainda mais a quantidade de ônibus e mantendo a tendência de aumento do número de automóveis e motocicletas, o sistema de mobilidade pode ficar sobrecarregado e se tornar uma solução não eficiente para melhoria do transporte urbano visto que “...quanto maior o fluxo horário de veículos, tanto menor será a velocidade deste fluxo e, portanto, tanto maior será o tempo de viagem entre a origem e o destino da viagem, e por consequência maior será o impacto ambiental externo provocado pelas emissões de gases veiculares...” (MacDowell, 2012 p.118).

Uma importante solução seria a implementação e extensão das linhas de metrô, que além de ambientalmente amigável pelo seu baixo índice de emissões, é capaz de “desafogar” parte do congestionamento, aumentando ainda mais o potencial de redução de emissões (quando se compara com outros modais) e melhorando o fluxo e velocidade operacional dos ônibus. Pela análise de custo, no entanto, o metrô exige grandes quantidades de investimento com o “payback” de longo prazo, além do período de construção ser demorado vis a vis outros modais, o que inviabiliza a implementação deste.

Uma alternativa mais viável seria o sistema conhecido como *Bus Rapid Transit* (BRT) que são, em grande parte, ônibus articulados que trafegam por corredores exclusivos, com estações e trajetos definidos e com um sistema de pagamento antes do embarque. O sistema visa facilitar o tempo de viagem dos ônibus sem intervenção do tráfego das vias comuns e uma considerável redução da frota convencional. Juntamente com este sistema funciona o *Bus Rapid System* que são ônibus comuns que possuem predominantemente uma faixa exclusiva e pontos escalonados. Ambos os sistemas são mais atraentes quanto ao seu custo, capacidade de transporte de passageiros e a possibilidade de implantação com tempo consideravelmente menor que o metrô. No entanto, como desvantagem do BRT seria o grande número de acidentes (comparados ao sistema de metro), o comprometimento de uma via do sistema viário (no caso do BRS) e o uso de combustíveis fósseis.

Atualmente na cidade Rio de Janeiro, esta em processo a implantação os sistemas de BRT e BRS, além a extensão do metro integrando a Barra da tijuca. Isso nos leva a considerar a questão de que o sistema de mobilidade funciona como um conjunto de modais e que é importante o planejamento deste sistema como um todo considerando sempre o bem estar da sociedade e o

desenvolvimento sustentável. O presente trabalho estimou que no cenário constante, a frota de ônibus terá um grande crescimento e conseqüentemente das emissões de poluentes. Isso nos leva a crer que há a necessidade de investimento em alternativas e modais mais limpos visando suprir a demanda pela mobilidade com o demasiado aumento populacional na cidade do Rio de Janeiro.

Referências bibliográficas

1. ANDRADE, R.; SANTOS, E. **Quantificação das Emissões de Gases Efeito Estufa – GEEs – Segundo Matriz Energética Diesel ou GNV no Transporte Público por Ônibus em NATAL–RN.** HOLOS - ISSN 1807-1600, 2009. Disponível em: <<http://www.cefetrn.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/271/252>>. Acesso em: 28 Out. 2013.
2. Base de dados DENATRAN – Disponível em: <<http://www.denatran.com.br>>. Acesso em: 10 Mar. 2014.
3. Base de dados Fetranspor - Rio de Janeiro, 2014
4. BARTLETT, M.S. **On the theoretical specification of sampling properties autocorrelated Time Series.** Journal of the Royal Statistical Society, série B, vol. 27.
5. BOX, GEORGE E. P.; JENKINS, GUVILYM M.; REISEL, GREGORE C. **Time series analysis: forecasting and control.** Terceira edição, Editora Prentice-Hall International, 1994.
6. BROWN, ROBERT G. **Exponential Smoothing for Predicting Demand.** Cambridge, Massachusetts: Arthur D. Little Inc. p. 15, 1956.
7. CAVALCANTI NETTO, M. A. **A previsão com a metodologia de Box-Jenkins,** 2007. Disponível em: <<http://www.ie.ufrj.br/download/APrevisaoComMetodologiadeBox-Jenkins.pdf>> Acesso em: 30 Abril 2014.
8. DURAIAPPAH, A. **Global Warming and Economic Development: a holistic approach to international policy co-operation and co-ordination.** Vol. 2. Austin: Kluwer Academic Publishers, 1993.
9. GIDDENS, ANTHONY. **A política da mudança climática.** Rio de Janeiro, 2010.
10. GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, COPPE/LIMA. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado do Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro, RJ: Centro de Estudos Integrados sobre Meio Ambiente e Mudanças Climáticas – Secretaria do Ambiente do Estado do RJ, 2011.

11. HOLT, CHARLES C. (1957). "**Forecasting Trends and Seasonal by Exponentially Weighted Averages**". Office of Naval Research Memorandum 52. reprinted in Holt, Charles C. (January–March 2004). "Forecasting Trends and Seasonal by Exponentially Weighted Averages". *International Journal of Forecasting* 20 (1): 5–10. doi:10.1016/j.ijforecast.2003.09.015.
12. IPCC, The Intergovernmental Panel for Climate Change – Painel Intergovernamental para Mudança do Clima. **Quarto relatório do painel intergovernamental sobre mudança do clima, AR4**. Organização das Nações Unidas (ONU): 2007.
13. MACDOWELL, FERNANDO. **Modernização e ampliação da capacidade da autoestrada Lagoa-Barra**. Rio de Janeiro, RJ, 2012.
14. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Primeiro inventário de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários – relatório final**. Jan. 2011. Disponível em: < www.mma.gov.br >. Acesso em: 25 de outubro. 2013.
15. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanco energético nacional 2013**: ano base 2012. Ministério das Minas e Energia, Brasília, DF, 2013.
16. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCTI). **Emissões de gases de efeito estufa no transporte rodoviário**. Relatórios de referencia: Setor Energia. 2º Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Brasília, DF: MCTI, 2010.
17. MORETTI, PEDRO A.; TOLOI, CLÉLIA M.C. **Análise de Séries Temporais**. segunda edição, editora Edgard Blücher, 2006.
18. POKORNY, M. **An introduction to econometrics**. Basil Blackwell, Nova York, 1987
19. SCHIPPER, L.; PELLING, M. **Disaster risk, climate change and international development: scope for, and challenges to, integration**. Overseas Development Institute, 2006
20. SHEFFI, Y. **Urban transportation networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming models**. 1985.
21. SOUZA, R.C.; Camargo, M.E. **Análise e Previsão de Séries Temporais: Os Modelos ARIMA**. Ijuí, RS, SEDIGRAF, 1996.
22. STERN, D.; COMMON, M.; BARBIER, E. **Economic Growth and Environmental Degradation: The Environmental Kuznets Curve and Sustainable Development**. *World Development*, Vol. 24, No 7, 1996.

23. STERN, N. **The economics of climate change**. Cambridge University Press, 2007.
24. TORRE, A.; FAJNZYLBER, P.; NASH, J. **Low-Carbon Development: Latin American Responses to Climate Change**. Washington DC: World Bank Latin American and Caribbean studies, 2009
25. VASCONCELLOS, Eduardo Alcântara de. **Transporte e meio ambiente: conceitos e informações para análise de impactos**. São Paulo: Ed do autor, 2006.