



Universidade de Brasília

Centro de Desenvolvimento Sustentável

CIDADE SUSTENTÁVEL? Impactos ambientais e a eficiência energética do sistema de mobilidade urbana do Distrito Federal.

MARIA LUIZA MACHADO SANTOS

BRASÍLIA

2017

Universidade de Brasília

Centro de Desenvolvimento Sustentável

CIDADE SUSTENTÁVEL? Impactos ambientais e a eficiência energética do sistema de mobilidade urbana do Distrito Federal.

Dissertação de Mestrado Acadêmico

MARIA LUIZA MACHADO SANTOS

Orientador: Professor Armando Caldeira Pires

Co-orientador: Professor Augusto César de Mendonça Brasil

BRASÍLIA

2017

A Raquel e Idelson, pela oportunidade de conviver e viver a natureza desde sempre,
para sempre.

“You cannot force someone to comprehend a message that they are not yet ready to receive, but never underestimate the power of planting a seed.”

RESUMO

O conceito de metabolismo urbano preconiza que as cidades sustentáveis devem implementar medidas de eficiência energética em seus fluxos diários. A mobilidade urbana sustentável surge como um elemento importante desse metabolismo, pois afeta diretamente dimensões importantes do desenvolvimento: o meio ambiente, a sociedade e a economia. Para isso, devem-se aumentar os investimentos no transporte coletivo e em transportes que fazem uso de energia limpa. Dessa forma, essa pesquisa teve como objetivo analisar estratégias de mobilidade urbana do Distrito Federal em termos de eficiência energética e emissões de gases de efeito estufa, utilizando avaliação de ciclo de vida (ACV), nos cenários de 2010 e 2020. Para tanto, foi elaborado o modelo de mobilidade urbana do DF com base nos cenários propostos pelo Plano Diretor de Transporte Urbano elaborado pelo Governo do Distrito Federal. Assim, foram analisados os níveis de eficiência energética e ambiental do sistema em termos de Potenciais de Aquecimento Global (GWP) e Demanda de Energia Primária (PED), comparando diferentes tipos de modais, e também entre transporte coletivo e individual. Os resultados indicam que há aumento do nível de emissões e da demanda de energia primária em todos os cenários, sendo necessária a verificação do nível de eficiência em termos de passageiros e distância percorrida. Em termos absolutos, enquanto no cenário Nada a Fazer 2010 são emitidos 0,82 milhões de kg de CO₂ equivalente e transportados 501.465 passageiros, no cenário Nada a Fazer 2020, as emissões evoluem para 1,37 milhões de kg de CO₂ equivalente, ao transportar 689.119 passageiros. Em termos relativos, o cenário de maior eficiência energética e ambiental é o cenário 2-2020, pois ao analisar pela quantidade de passageiros transportados, no cenário Nada a Fazer 2010, o ônibus alongado do DF emite 0,55 kg CO₂-equiv. por passageiro e consome 7,19 MJ por passageiro, no cenário 2-2020 esse mesmo ônibus emite 0,25 kg de CO₂-equiv. por passageiro e consome 3,53 MJ por passageiro. Já o automóvel no cenário Nada a Fazer 2010 emite 3,06 kg de CO₂-equiv. por passageiro e consome 33,01 MJ, no cenário 2, emite 3,27 kg de CO₂-equiv. por passageiro e consome 54,72 MJ. A conclusão é que se as melhorias propostas no transporte coletivo fossem realmente implementadas, poderia haver ganho de eficiência em termos de passageiros transportados, no entanto a alta representatividade do transporte individual acarreta em danos ambientais e energéticos bastantes severos, comprometendo todo o sistema de mobilidade urbana.

Palavras-chave: mobilidade urbana sustentável; eficiência energética; metabolismo urbano.

ABSTRACT

The concept of urban metabolism calls for sustainable cities to implement energy efficiency measures in their daily flows. Sustainable urban mobility emerges as an important element of this metabolism, as it directly affects important dimensions of development: the environment, society and the economy. To this end, investments in public transport and in transportation that use clean energy must be increased. The objective of this research was to analyze urban mobility strategies of the Federal District in terms of energy efficiency and greenhouse gas emissions, using life cycle assessment (LCA), in the scenarios of 2010 and 2020. Developed the model of urban mobility of the DF based on the scenarios proposed by the Urban Transport Master Plan prepared by the Federal District Government. Thus, we analyzed the energy and environmental efficiency levels of the system in terms of Global Warming Potentials (GWP) and Primary Energy Demand (PED), comparing different types of modes, as well as between collective and individual transport. The results indicate that there is an increase in the level of emissions and demand for primary energy in all scenarios, and it is necessary to verify the level of efficiency in terms of passengers and distance traveled. In absolute terms, while in the 2010 Nothing to Do scenario, emissions of 0.82 million kg of CO₂ equivalent are emitted and 501,465 passengers are transported, in the scenario "Nothing to do 2020", emissions increase to 1.37 million kg of CO₂ equivalent when transporting 689,119 passengers. In relative terms, the scenario of greater energy and environmental efficiency is scenario 2-2020, because when analyzing the number of passengers transported, in the Nothing to Do 2010 scenario, the DF long-distance bus emits 0.55 kg CO₂-equiv. Per passenger and consumes 7.19 MJ per passenger, in scenario 2-2020 that same bus emits 0.25 kg of CO₂-equiv. Per passenger and consumes 3.53 MJ per passenger. The car in the 2010 Nada a Fazer scenario emits 3.06 kg of CO₂-equiv. Per passenger and consumes 33.01 MJ, in scenario 2, it emits 3.27 kg of CO₂-equiv. Per passenger and consumes 54.72 MJ. The conclusion is that if the improvements proposed in collective transport were actually implemented, there could be efficiency gains in terms of passengers transported, however the high representativity of individual transport entails quite severe environmental and energy damages, compromising the entire urban mobility system.

Keywords: sustainable urban mobility; energy efficiency; urban metabolism.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1: Área de abrangência do PDTU-DF..... | 42 |
| Figura 2: Intervenções nas Alternativas 1A e 1B..... | 43 |
| Figura 3: Intervenções na Alternativa 2..... | 44 |
| Figura 4: O modelo desenvolvido sobre o sistema de mobilidade urbana do Distrito Federal e Entorno..... | 52 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1: Taxa de motorização do DF, de 2000 a 2009. | 45 |
| Gráfico 2: Taxa de motorização do Entorno, de 2001 a 2009..... | 45 |
| Gráfico 3: Índice de Passageiros por Quilômetro (IPK) do DF, de 2001 a 2009. | 47 |
| Gráfico 4: Índice de Passageiros por Quilômetro (IPK) dos ônibus urbanos em capitais brasileiras, de 1995 a 2015. | 48 |
| Gráfico 5: Total de GWP e PED, por cenário. | 61 |
| Gráfico 6: GWP por tipo de combustível, por cenário. | 62 |
| Gráfico 7: PED por tipo de combustível, por cenário..... | 63 |
| Gráfico 8: GWP total e por tipo de combustível de transporte coletivo, por cenário. | 64 |
| Gráfico 9: PED total e por tipo de combustível de transporte coletivo, por cenário..... | 64 |
| Gráfico 10: GWP por tipo de modal do transporte coletivo, por cenário..... | 66 |
| Gráfico 11: PED por tipo de modal do transporte coletivo, por cenário. | 66 |
| Gráfico 12: GWP / Passageiro, por modal e cenário..... | 68 |
| Gráfico 13: PED / Passageiro, por modal e cenário..... | 69 |
| Gráfico 14: GWP / Passageiros X Velocidade média, por modal e cenário..... | 70 |
| Gráfico 15: PED / Passageiros X Velocidade média, por modal e cenário. | 70 |
| Gráfico 16: GWP / Passageiros X Velocidade média, entre transporte coletivo e individual, por cenário..... | 71 |
| Gráfico 17: PED / Passageiros X Velocidade média, entre transporte coletivo e individual, por cenário..... | 72 |
| Gráfico 18: GWP e PED por IPK, entre transporte coletivo e individual, por cenário (em log 10). | 74 |
| Gráfico 19: Variação percentual do TOTAL de GWP e PED, em relação ao cenário "Nada a Fazer 2020"..... | 75 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Características dos ônibus urbanos brasileiros. | 53 |
| Tabela 2: Fases do PROCONVE e conformidade ao padrão Euro..... | 54 |
| Tabela 3: Frota de ônibus do Distrito Federal, por ano. | 54 |
| Tabela 4: Dados do cenário "Nada a Fazer - 2010"..... | 57 |
| Tabela 5: Dados do cenário "Nada a Fazer - 2020"..... | 57 |
| Tabela 6: Dados do cenário "1A - 2020" | 58 |
| Tabela 7: Dados do cenário "1B - 2020" | 58 |
| Tabela 8: Dados do cenário "2 - 2020"..... | 58 |
| Tabela 9: Representatividade de cada combustível no total de GWP e PED, por cenário. | 61 |
| Tabela 10: Representatividade do modal ferroviário, em relação ao transporte coletivo de cada cenário..... | 65 |

LISTA DE SIGLAS

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida
ANTP – Associação Nacional de Transporte Público
ANTT – Agência Nacional dos Transportes Terrestres
BRT – Bus Rapid Transit
CDI - City Development Index
CH₄ – Metano
CNT – Confederação Nacional do Transporte
CO₂ - Dióxido de Carbono
COP21 – 21º Conferência das Partes
DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito
DETRAN/DF – Departamento de Trânsito do Distrito Federal
DF – Distrito Federal
EVI – Environmental Vulnerability Index
GDF – Governo do Distrito Federal
GEE – Gases de Efeito Estufa
GWP – Global Warming Potential
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMUS – Índice de Mobilidade Urbana Sustentável
IPK – Índice de Passageiro por Quilômetro
LCI – Life Cycle Inventory
LCIA – Life Cycle Inventory Assessment
N₂O – Óxido Nitroso
NDC – National Determinations Contributions
OECD - Organisation for Economic Cooperation and Development
ONU – Organização das Nações Unidas
PAC – Programa de Aceleração do Crescimento
PDTU/DF – Plano Diretor de Transporte Urbano do Distrito Federal
PED – Primary Energy Demand
PIB – Produto Interno Bruto
PROCONVE – Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
SEMOB – Secretaria de Mobilidade Urbana
SF₆ - Hexafluoreto de Enxofre
SO₂ – Dióxido de Enxofre
STPC/DF – Secretaria de Transporte Público Coletivo do Distrito Federal
TERM – Transport Environmental Reports
VLT – Veículo Leve sobre Trilhos
WBCSD - World Business Council for Sustainable Development

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 Objetivos da pesquisa | 14 |
| 1.2 Justificativa | 14 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 17 |
| 2.1 Cidades sustentáveis e metabolismo urbano | 17 |
| 2.1.1 Cidades concentradas ou desconcentradas? | 22 |
| 2.2 Mobilidade e transporte sustentável | 24 |
| 2.2.1 Estratégias de transição | 31 |
| 2.3 Eficiência energética, mobilidade urbana e tendências | 33 |
| 2.4 Ecologia Industrial, ACV e a mobilidade urbana | 36 |
| 3 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO | 41 |
| 4 METODOLOGIA..... | 49 |
| 4.1 Detalhamento do cálculo do modelo no GaBi (ACV) | 54 |
| 4.2 Descrição dos cenários e indicadores utilizados | 56 |
| 5 ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS | 60 |
| 5.1 GWP e PED por passageiro..... | 67 |
| 5.2 GWP e PED por (Passageiro x Km)*Hora..... | 69 |
| 5.3 GWP e PED por Índice de Passageiro por Quilômetro (IPK)..... | 73 |
| 5.4 Considerações sobre as alternativas..... | 75 |
| 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 77 |
| REFERÊNCIAS..... | 81 |
| ANEXO A..... | 87 |

1 INTRODUÇÃO

A realidade das cidades brasileiras é caracterizada pela ineficiência da gestão urbana. No quesito mobilidade urbana, há impactos ambientais, devido à poluição e uso do solo, e econômicos e sociais, devido à dificuldade do fluxo de bens e pessoas dentro do ambiente urbano. Esses impactos são reais e mensuráveis, têm escala local e global, e influenciam a economia e a qualidade de vida dos habitantes (COSTA, 2008). Em 2003, o governo brasileiro criou o Ministério das Cidades com o objetivo de desenhar uma política de desenvolvimento urbano que cause menos impactos ambientais, pautada também na questão da mobilidade urbana (BOARETO, 2008).

Os principais desafios do sistema de transporte urbano são relacionados aos custos envolvidos e ao compromisso em mudar o padrão atual. No entanto, essa transição deve ser feita de forma cuidadosa, com planejamento, considerando a dinâmica de cada cidade e os impactos no longo prazo (GRAEDEL, 2001). O Governo do Distrito Federal (GDF), por meio do Plano Diretor de Transporte Público (PDTU), planeja uma mudança do padrão atual de mobilidade urbana reduzindo o número de viagens motorizadas, incentivando o transporte coletivo, transportes não-motorizados e deslocamentos a pé, integrando tecnologias de transporte disponíveis, assegurando o direito de ir e vir às pessoas com restrições de mobilidade, e atendendo à demanda atual de transportes (GDF, 2010). Considerando esse contexto, este estudo tem como objetivo responder à seguinte pergunta de pesquisa: “o quanto as diretrizes de mobilidade urbana do Distrito Federal, que consideram o curto e médio prazo, contribuem para a eficiência ambiental e energética desse sistema?”.

Para se estudar eficiência energética do sistema de transporte, deve-se avaliar a fonte de energia do setor. A avaliação de ciclo de vida (ACV), por considerar as fronteiras do sistema de combustíveis alternativos desde a produção, armazenamento, transporte, produção, manutenção, uso e fim de ciclo de vida do veículo, fornece indicadores importantes sobre esses cenários complexos. Os resultados podem ser usados para integrar informações técnicas em termos de desempenho econômico e ambiental de todo o sistema, assim como seus possíveis cenários, fornecendo uma base de conhecimento abrangente da situação. Dessa forma, gestores e atores envolvidos no

processo de tomada de decisão podem escolher a alternativa mais eficiente em busca de uma mobilidade mais ecológica (BARTOLOZZI; RIZZI; FREY, 2013).

Os sistemas de trânsito público são tipicamente posicionados como redutores do impacto ambiental do transporte. À medida que os políticos e os tomadores de decisão começam a incorporar o pensamento do ciclo de vida ao planejamento, novas estratégias devem ser desenvolvidas para integrar a ACV. Os resultados também mostram que a decisão de implementar um novo sistema de trânsito em uma cidade tem impactos significativos locais e remotos de energia e meio ambiente além da operação do veículo. Esses impactos no ciclo de vida são o resultado de processos indiretos da cadeia de suprimentos que muitas vezes são ignorados pelos políticos e tomadores de decisão, bem como estratégias de mitigação ambiental (CHESTER et al, 2013).

A solução para alguns dos problemas causados pelo atual padrão de mobilidade urbana está na implementação e aprimoramento de tecnologias eco eficientes. Esse conceito é utilizado quando organizações conseguem oferecer um preço competitivo, satisfazer as necessidades humanas, reduzir os impactos ambientais e a intensidade do uso de recursos ao longo do ciclo de vida (USÓN et al, 2011). Para resolver a questão do uso de combustíveis fósseis, que emitem gases poluentes e de efeito estufa, é necessário desenvolver alternativas com custos menores e maior eficiência (WEINBERG; KALTSCHMITT, 2013).

No Brasil, a poluição atmosférica é crescente devido ao aumento constante do uso do transporte motorizado e dependência de energias fósseis. O setor de transportes é o segundo maior consumidor de energia do país, responsável por 31% da demanda. O crescimento é de 5,5% ao ano, sendo a maior contribuição vinda do transporte rodoviário (tanto de cargas quanto de pessoas). Em termos ambientais, este setor é responsável por 49% das emissões antrópicas de CO₂ associadas à matriz energética (EPE, 2014). Devido a esses e outros impactos ambientais, o uso de energia fóssil é considerado cada vez mais ineficiente. Dessa forma, o início do século XXI é marcado pela mudança do uso intenso desse tipo de energia para uso da energia solar e biomassa

e demais fontes de energias alternativas (RODRIGUES et al, 2008). Essa mudança é considerada uma estratégia ambiental importante (D'AMORE; BEZZO, 2016).

1.1 Objetivos da pesquisa

Considerando a pergunta de pesquisa exposta anteriormente e a justificativa dos fatores mais relevantes para análise de impactos da mobilidade urbana, este estudo tem como objetivo **analisar estratégias de mobilidade urbana em termos de eficiência energética e emissões de GEE, utilizando avaliação de ciclo de vida (ACV) sobre cenários propositivos.**

A fim de atingir esse objetivo, e também para complementá-lo, a pesquisa possui os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar ACV como uma ferramenta de diagnóstico de políticas de mobilidade urbana mais eficientes;
- b) Comparar os impactos energéticos do padrão de mobilidade urbana do Distrito Federal;
- c) Comparar os impactos da emissão de gases poluentes e de efeito estufa (GEE) do setor de transportes do Distrito Federal, considerando a fonte de energia utilizada;
- d) Avaliar indicadores de eficiência de consumo energético em relação ao transporte de passageiros do Distrito Federal.

1.2 Justificativa

No ambiente urbano, os problemas atuais causados por falhas no planejamento e gestão das cidades provocam uma necessidade de estudos e soluções que melhorem a qualidade de vida urbana. A cidade representa um sistema de grande impacto do ser humano na natureza e tem influência global, pois depende de insumos de fora de sua área geográfica para manter o seu metabolismo urbano. Além disso, a expansão dos sistemas urbanos é acompanhada do aumento do consumo de energia, da dissipação de calor, impermeabilização dos solos, alterações microclimáticas, impactos na biodiversidade, acumulação de carbono, poluição atmosférica e sonora, aumento da produção de resíduos sólidos, líquidos e gasosos (DIAS, 2002).

A mobilidade sustentável possui um papel imprescindível na construção de um ambiente urbano sustentável e o sistema de transporte moderno possui três elementos-chave: sustentabilidade, segurança e eficiência. Para que essa mobilidade seja implementada, devem-se investir em modais de transporte mais ecológicos, assim como rever a questão dos custos por viagem (MOEINADDINI; ASADI-SHEKARI; SHAH, 2015).

No Brasil, as atuais políticas de transporte urbano baseiam-se na ampliação do sistema viário (construção de vias e viadutos, por exemplo) para modais motorizados, inclusive o carro. No entanto, políticas de mobilidade que consideram a inclusão social devem priorizar o transporte coletivo e o não-motorizado, uma vez que esses tipos de transportes são mais acessíveis aos grupos de baixa renda (GOMIDE, 2003). Em relação aos impactos sociais, os deslocamentos estão fortemente relacionados a atributos socioeconômicos e à escolha dos transportes disponíveis. No DF, 53% das viagens são deslocamentos ao trabalho, e 25% ao estudo. Isso significa que o impacto da tarifa pode excluir a população de baixa renda de ter acesso a direitos importantes do desenvolvimento social e econômico, como acesso a emprego e estudos, e demais serviços urbanos como lazer e cultura (GDF, 2010). O transporte individual motorizado é excludente porque o custo total da mobilidade do transporte individual (por viagem) é quase 4 vezes maior que o custo do transporte coletivo (ANTP, 2015).

O aumento da produção de viagens motorizadas e migração do transporte coletivo para o individual são agravantes dos impactos negativos da mobilidade urbana no DF (GDF, 2010) e indicadores da insustentabilidade desse sistema. Ecoeficiência surge então como um conceito que trata que a sustentabilidade do sistema de transporte refere-se a um aumento da produção econômica sem um equivalente aumento dos danos ambientais causados por esse sistema. Deve-se internalizar os custos ambientais externos no preço dos transportes (GUDMUNDSSON, 2004).

O governo pode adotar estratégias para alcançar a mobilidade urbana sustentável, como: desenvolvimento urbano orientado para o transporte coletivo, incentivo a deslocamentos a pé e por bicicleta, restrições quanto ao uso do carro, oferta adequada de transporte público em conjunto com tarifa adequada, e segurança para pedestres e ciclistas (CAMPOS, 2006). Os transportes que causam os menores danos ambientais são

aqueles que fazem uso de energia limpa e renovável, reduzem ao mínimo o uso do solo e a emissão de ruídos e gases nocivos ao meio ambiente. Deslocamentos a pé e de bicicleta também são considerados de baixo impacto ambiental. Um transporte sustentável economicamente é aquele que possui custos aceitáveis, favorece a economia dinâmica e o desenvolvimento regional (OECD, 1996).

No contexto dos transportes, veículos com motores de maior eficiência de combustível ou a implementação de mudanças de modais mais ecológicos como a bicicleta foram consideradas eco inovações. Porém, o impacto ambiental dessas inovações pode ser mais fidedignamente mensurado em termos de ciclo de vida. A avaliação de ciclo de vida é defendida como uma ferramenta interessante de avaliações orientadas para tecnologia (VIVANCO; KEMP; van der VOET, 2015). A mudança para um sistema de mobilidade sustentável considera crucial reduzir o uso de combustíveis fósseis, adotando fontes de energia alternativas e mais ecológicas como biocombustíveis, eletricidade ou hidrogênio (BARTOLOZZI; RIZZI; FREY, 2013). Os resultados das avaliações de ciclo de vida indicam que os cenários baseados em combustíveis fósseis têm o maior impacto ambiental, enquanto nos cenários baseados em fontes de energia renováveis causam o menor impacto. Conclui-se que a escolha da fonte de energia é essencial para o desempenho ambiental do serviço de transporte (BRIGUGLIO et al, 2010).

Este estudo relaciona-se com a literatura acadêmica e científica sobre a questão da mobilidade urbana sustentável e seus impactos. A avaliação de ciclo de vida aplicada ao consumo de energia do sistema do Distrito Federal agrega valor aos estudos já realizados, e fornece mais insumos para a análise de políticas de transporte urbano e o processo de tomada de decisão. É importante que se estudem quais os ganhos que podem ser alcançados com a mudança da realidade de mobilidade urbana do DF de forma a embasar futuras decisões e justificar a transição para um sistema de mobilidade mais eficiente, considerando também a mudança de transportes motorizados para aqueles que usam energias alternativas às fósseis, contribuindo assim para o alcance da cidade sustentável.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cidades sustentáveis e metabolismo urbano

A busca pelo desenvolvimento sustentável surge como estratégia de mudança para sistemas mais ecológicos, justos e viáveis economicamente, pois esse desenvolvimento está pautado em três dimensões: economia, sociedade e meio ambiente. No entanto, a quarta dimensão – a Instituição – é adicionada, referente a instituições que moldam compromissos e sinergias entre as outras três dimensões (GUDMUNDSSON, 2004). A Comissão de *Brundtland* menciona que o desenvolvimento sustentável é aquele que consegue suprir as necessidades atuais sem prejudicar as próximas gerações de suprirem as suas (OECD, 1996).

Considerando que a maioria da população do Brasil se concentra nas cidades, e que o desenvolvimento sustentável depende dos padrões de produção e consumo das pessoas, e do funcionamento adequado dos sistemas de transporte e gestão de resíduos das áreas urbanas, essas atividades humanas que ocorrem no ambiente urbano devem ser realizadas tendo como objetivo final a sustentabilidade do sistema. Essas atividades estão relacionadas ao suprimento das necessidades da população, como moradia, saneamento básico, gestão de resíduos, reciclagem, acesso à energia, alimentação, educação, saúde e transporte. Ao alcançar esse objetivo, adquire-se bem-estar social e qualidade de vida, além da manutenção de recursos naturais (CONKE, 2015).

A avaliação do sistema sustentável das cidades ainda não foi muito bem consolidada, porque as condições para essa avaliação ainda são complexas e algumas vezes ambíguas. Para Acselrad (1999, p. 82), a cidade sustentável é aquela que, “para uma mesma oferta de serviços, minimiza o consumo de energia fóssil e de outros recursos materiais, explorando os fluxos locais e satisfazendo o critério de conservação de estoques e de redução de volume de dejetos”. Isso significa que a sustentabilidade da cidade está pautada na eficiência do uso dos recursos. Esse novo padrão poderia ser alcançado por meio da educação ambiental, da utilização de conceitos de ecoeficiência na gestão urbana, e da economia da reciclagem. Essas estratégias de transição para a sustentabilidade urbana estão relacionadas à adaptação das estruturas urbanas, em termos de “racionalidade eco-energética” ou “metabolismo urbano”.

Metabolismo urbano pode ser definido como a soma total dos processos tecnológicos e socioeconômicos que ocorrem nas cidades, resultando em crescimento, produção de energia e descarte de resíduos (KENNEDY; CUDDIHY; ENGEL-YAN, 2007) e pode ser equilibrado com o ajustamento desses fluxos em termos de matéria e energia em busca da eficiência (ACSELRAD, 1999).

O conceito de metabolismo urbano, que trata da troca de energias e materiais entre os sistemas sociais e ambientais como um processo relevante e também de interdependência entre esses sistemas, tem ganhado grande espaço nas ciências (FISCHER-KOWALSKI, 2002). Ao quantificar fluxos de materiais e energias é possível avaliar a direção de desenvolvimento de uma cidade (KENNEDY; CUDDIHY; ENGEL-YAN, 2007).

Além do interesse científico sobre a natureza do crescimento de uma cidade, há diversas razões para se estudar o metabolismo urbano. O incremento das atividades urbanas tem implicações na perda de terras agrícolas, florestas, biodiversidade, além de aumentarem o tráfego e a poluição (reduzindo a qualidade de vida dentro das cidades). Isso significa que as cidades possuem uma pegada ecológica cada vez maior (KENNEDY; CUDDIHY; ENGEL-YAN, 2007).

O desenvolvimento e o progresso das sociedades dependem de um excedente de energia disponível. Quanto mais energia uma sociedade está possibilitada de consumir, mais avançada ela poderá ser. Ou seja, o progresso social baseia-se no excedente de energia, pois primeiramente permite o crescimento social, e posteriormente dá margem para atividades que vão além das necessidades básicas, como as atividades culturais e de lazer, fomentando a economia. A energia e os materiais disponíveis permitirão que as atividades e trocas dentro deste espaço se realizem. No entanto, para que o ciclo esteja completo, é necessário que os resíduos da vida diária sejam devidamente removidos e descartados, sem causar incômodos, danos, e sem oferecer perigos à população (FISCHER-KOWALSKI, 2002).

Como o conceito de metabolismo urbano trata-se de uma representação ecossistêmica das cidades, a cidade pode ser considerada um sistema termodinâmico aberto, em que a entropia¹ é crescente. Uma alta entropia de um espaço urbano indica

¹ Entropia pode ser considerada uma medida das perdas de energia que não poderá mais ser aproveitada pelo sistema.

então uma alta poluição, e, portanto, um indicador de ineficiência energética. Uma cidade insustentável é aquela que, dentro dessa perspectiva, possui irreversibilidade termodinâmica. O planejamento urbano deve minimizar a degradação energética e reduzir essa irreversibilidade, para reduzir a pressão sobre o ambiente local e regional. O conceito de eficiência eco-energética contribui para uma cidade cada vez mais autossuficiente, que combate o efeito estufa, os processos entrópicos, e contribui para uma maior autonomia energética e econômica local (ACSELRAD, 1999).

Considerando esse contexto, novos modelos de planejamento e gestão urbana devem ser fundados na racionalidade econômica, para reduzir o impacto entrópico das atividades urbanas. A adoção de tecnologias mais eficientes em termos de espaço, matéria, energia e reciclagem surgem como solução a esse problema (ACSELRAD, 1999). Uma pesquisa realizada por Robert Ayres e Allen Kneese na década de 70, nos Estados Unidos, propôs analisar a poluição ambiental como um problema de equilíbrio de materiais para toda a economia. Isso ocorre porque a economia se baseia fortemente em recursos naturais (como ar e água) cada vez mais escassos, e ao longo do tempo essa escassez pode impedir o funcionamento ótimo do mercado. Dessa forma, o controle dos fluxos de materiais e da poluição tornam-se uma questão central da nossa sociedade, e, portanto, da economia (FISCHER-KOWALSKI, 2002).

O foco na dimensão material das cidades não significa que seja o aspecto mais importante de uma cidade. Esse foco pode ser adotado porque há diversas metodologias e dados confiáveis para a avaliação dos fluxos de materiais de uma cidade, em termos de disponibilidade de recursos e proteção ambiental (BRUNNER, 2007). A solução de problemas ambientais traz melhorias na qualidade de vida da população urbana (IIED, 2001). No entanto, a percepção e análise desses problemas ambientais assim como suas soluções são desafios complexos, um vez que as atividades humanas de uma cidade possuem uma escala temporal e espacial grande, já que o suprimento da população urbana vem de localidades externas, assim como as suas emissões e resíduos gerados alteram de forma significativa diversos ecossistemas (ALBERTI, 1999).

Muitos dados, por exemplo, sugerem que o metabolismo urbano das cidades está aumentando com o passar dos anos. Isso significa que fluxos de material, energia e água estão cada vez mais intensos. No entanto, algumas cidades, como é o caso de Toronto, conseguiram aumentar seu nível de eficiência em relação a esses fluxos. Alguns

locais passam por situações paradoxais: ao mesmo tempo que conseguem implementar reciclagem de lixo em alta escala, e assim reduzir desperdício de resíduos residenciais, outros fluxos de resíduos, como comercial e industrial, aumentam. Semelhantemente, emissões de Dióxido de Enxofre (SO₂) e materiais particulados tem diminuído significativamente em muitas cidades, enquanto outros poluentes do ar como NO_x têm aumentado. Mudanças no metabolismo urbano possuem variação de uma cidade para outra devido às particularidades de cada região e população (KENNEDY; CUDDIHY; ENGEL-YAN, 2007).

De uma forma geral, as emissões de contaminantes costumam estar bastante associada às emissões vindas do consumo de energia da população. No entanto, isso poderia ser amenizado caso as cidades explorassem melhor fontes de energias renováveis, como placas fotovoltaicas, aquecimento solar de água ou a recuperação de energia a partir de águas residuais (KENNEDY; CUDDIHY; ENGEL-YAN, 2007). Os sistemas de transporte também têm relevância na poluição e emissão, que são diretamente relacionadas ao consumo de energia e aos tipos variados de combustíveis. Dessa forma, produzem impactos ambientais na qualidade do ar e na produção de ruídos (MILLER et al, 2016).

As mudanças para uma sociedade mais sustentável devem ser gerenciadas de forma sistêmica, como o próprio termo “metabolismo” sugere. Isso significa que deve haver uma mudança econômica, social, tecnológica e histórica para alterar o metabolismo energético das cidades. Para se alterar os resultados finais de um sistema (como poluição, emissões e resíduos), deve-se primeiramente alterar as entradas desse sistema, assim como a forma com que ele funciona internamente, em termos de processos e fluxos (FISCHER-KOWALSKI, 2002). Diante da necessidade da busca e do alcance de cidades sustentáveis, além da importância de se avaliar diversos indicadores de desempenho econômico e ambiental de uma cidade, algumas metodologias de avaliação do nível de produção e eficiência das atividades urbanas foram desenvolvidas.

A metodologia da pegada ecológica avalia a quantidade de área necessária para suprir os serviços utilizados por determinada população. Essa metodologia, quando aplicada aos grandes centros urbanos, revela que esses lugares exigem recursos de locais cada vez mais distantes. Isso significa que a produção e o consumo de uma cidade vão além de suas fronteiras geográficas. Para que o desenvolvimento sustentável seja

alcançado, é necessária uma mudança dos processos de toda a cadeia produtiva (REES; WACKERNAGEL, 1996).

Devido a uma contínua dependência funcional dos processos ecológicos, alguns economistas passaram a considerar espécies, ecossistemas e recursos naturais como formas de capital natural. Dessa forma, o desenvolvimento sustentável nunca será alcançado se houver o esgotamento contínuo do capital necessário à produção e consumo. No momento atual da história, a população humana e a média de consumo vêm crescendo, enquanto que a área total de produção e os estoques de capital natural são fixos ou decrescentes. Na metodologia de pegada ecológica, um sistema vai ser considerado insustentável quando o padrão de consumo exigir mais do que está disponível na natureza em termos de recursos, terra e água disponível, representando uma lacuna de sustentabilidade e um déficit ecológico. Nesses casos, o consumo deve ser reduzido em busca da sustentabilidade ecológica no longo prazo. A metodologia de pegada ecológica contempla algumas categorias de consumo, mas não todas. Outro limitante da metodologia refere-se às análises em relação ao descarte de resíduos que vão além do CO₂. Isso significa que os cálculos desse método podem estar subestimando o real impacto humano no meio ambiente. A pegada ecológica evidencia que os impactos ambientais de uma cidade vão além de suas localizações geográficas devido ao enorme aumento do consumo per capita de energia e materiais (REES; WACKERNAGEL, 1996; BOHRINGER; JOCHEM, 2007).

Em sua pesquisa sobre índices de sustentabilidade, Bohringer e Jochem (2007) abordam sobre diversas metodologias que mensuram a sustentabilidade dos sistemas sociais, econômicos e ecológicos.

O “Índice de Desenvolvimento Urbano” (sigla CDI em inglês), sugerido pela *United Nations Centre for Human Settlements* (UN-HABITAT), considera cinco sub-índices: infraestrutura; água; saúde; educação; e o índice de produto urbano, baseado no PIB da cidade. A questão do transporte está envolvida no índice de infraestrutura.

O “Índice de Performance Ambiental” (sigla ESI em inglês) aborda a necessidade de indicadores sobre a performance das políticas em reduzir danos ambientais na saúde humana, em promover a vitalidade dos ecossistemas e em gerir os recursos

naturais. Avaliam-se seis categorias de políticas, em relação a um objetivo estabelecido por acordos internacionais, nacionais ou consenso científico.

O “Índice de Vulnerabilidade Ambiental” (sigla EVI em inglês), desenvolvido pela *South Pacific Applied Geoscience Commission*, estabelece 32 indicadores de perigos ambientais, 8 indicadores de resistência e 10 indicadores avaliam os impactos ambientais. A escala de categorização varia de 1 (alta resiliência) a 7 (baixa resiliência).

Em vista de toda a natureza holística do desenvolvimento sustentável, é difícil estabelecer uma única base de variáveis que consiga avaliar a sustentabilidade de determinado sistema. A análise empírica de situações vem se tornando cada vez mais possível graças à disponibilidade de dados e constante monitoramento do desenvolvimento sustentável. Devido à realidade de cada país, é importante que cada situação seja avaliada conforme os requisitos de cada região. Portanto um índice pode ser útil para avaliar as cidades de um país, mas não de todos.

2.1.1 Cidades concentradas ou desconcentradas?

As cidades atraem um número crescente de pessoas. Por um lado, essa aglomeração facilita algumas atividades econômicas, mas ao mesmo tempo traz diversos impactos negativos ambientais e sociais. Então o crescimento urbano reflete um *trade-off* entre economias de aglomeração (ou de escala) e “deseconomias”, como concentração excessiva da população e deterioração ambiental (MORI; CHRISTODOULOU, 2012).

Uma cidade concentrada possui serviços, moradias e conseqüentemente pessoas concentradas em áreas pequenas, ou em uma mesma área. Isso pode tornar o provimento de serviços mais eficiente, assim como o uso de seus recursos, pois reduzem o consumo de energia por habitante. Essa característica pode favorecer a busca pela sustentabilidade urbana. Ao mesmo tempo, as cidades concentradas sofrem efeitos negativos devido à alta densidade da produção de rejeitos, comprometendo a sustentabilidade local. No entanto, cidades pouco densas, ou fragmentadas, são vistas como geradoras de consumo energético (devido às longas distâncias), e possuem custos altos com serviços públicos, como transporte, fornecimento de água, energia etc (REES; WACKERNAGEL, 1996; ACSELRAD, 1999). No caso da mobilidade urbana, uma cidade ou

um bairro disperso pode dificultar a eficiência do sistema, devido ao acesso do usuário e da quantidade de pessoas transportadas em uma determinada área.

A forma de distribuição das funções de uma cidade interfere no modal escolhido para transporte. Nas cidades em que há centros de trabalho concentrados, longe das residências, pode haver maior dependência em automóveis. Estratégias de desenvolvimento orientadas ao transporte público preconizam que os serviços de transporte devem estar disponíveis em áreas próximas à concentração da população e às suas atividades. Assim, com a demanda mais concentrada há uma maximização da eficiência do transporte público, ou seja, com o aumento da migração para o transporte público, o número de viagens por automóvel diminui, assim como as emissões de GEE (BARCZAK; DUARTE, 2012).

Em termos de mobilidade urbana, a cidade compacta, devido ao seu uso misto e à alta concentração de habitantes em um mesmo espaço, pode apresentar maior eficiência energética, uma vez que reduz a distância dos trajetos e maximiza a oferta de transporte público. Alguns estudiosos consideram que eficiência energética e qualidade de vida são características de cidades descentralizadas e descompactadas, uma vez que recorrem a fontes locais de energia e produção de alimentos em locais próximos e disponíveis. Argumenta-se que a sustentabilidade urbana será alcançada através da integração entre locais de trabalho, moradia e lazer, de forma a reduzir as distâncias, a mobilidade da energia, de pessoas e de bens. Tornar a cidade mais “caminhável” ou acessível aos pedestres também é considerada uma estratégia interessante (ACSELRAD, 1999).

Apesar de a densidade populacional não influenciar por si só a demanda de transportes, a distância do centro da cidade e outros centros de emprego influencia. Portanto, a hipótese relacionando demanda por transporte, consumo de energia e estrutura espacial da cidade é válida. No caso das cidades dos Estados Unidos, a forma geográfica expansiva contribui pelo menos em parte para o alto consumo per capita de energia (KENNEDY; CUDDIHY; ENGEL-YAN, 2007). Alguns estudos em cidades da Europa e Ásia constataram que aquelas que possuem elevadas densidades populacionais costumam ter um nível baixo de dependência em automóveis. Isso significa que o

transporte público é mais viável quando a cidade é mais densa e quando as distâncias de deslocamento são menores (BARCZAK; DUARTE, 2012).

No entanto, outros estudos indicam que o adensamento urbano pode concentrar as viagens em um espaço limitado, aumentando congestionamentos, e por consequência a diminuição da velocidade média dessas viagens o que resulta em um gasto maior de energia por viagem, caracterizando ineficiência do sistema. (BARCZAK; DUARTE, 2012).

Quando as políticas públicas urbanas não conseguem ofertar serviços urbanos compatíveis com as demandas sociais, provocam um alto desequilíbrio urbano e por consequência aumentam ainda mais a insustentabilidade da cidade. Essas políticas públicas ineficientes e pouco efetivas não fazem o devido investimento em redes e infraestruturas, pois não conseguem acompanhar o crescimento populacional e da demanda. Dessa forma, essa lacuna na oferta de serviços poderá segmentar ainda mais o espaço urbano social, devido à diferença entre populações atendidas e não-atendidas, incrementando os conflitos. As políticas públicas urbanas devem ter a capacidade de se adaptarem e terem como foco a busca pela equidade, e também pela eficiência dos serviços (ACSELRAD, 1999). Brunner (2007) atenta que os estudos de metabolismo urbano além de quantificar os fluxos de matérias e energias (para que seja possível gerir melhor os recursos naturais disponíveis e evitar impactos de poluição), devem também considerar a distribuição igual desses recursos dentro de uma sociedade.

2.2 Mobilidade e transporte sustentável

Considerando a mobilidade urbana como um elemento do metabolismo urbano, a partir do momento em que ela seja sustentável, irá contribuir para a sustentabilidade da cidade. Somente será possível maximizar a troca de bens e serviços, cultura e conhecimentos entre os habitantes de uma cidade, se houver condições de mobilidade devidamente adequadas aos seus usuários (BRASIL, 2004). As cidades devem dar o devido suporte à mobilidade, cumprindo sua função social, proporcionando crescimento econômico, desde que haja limite sobre os impactos negativos sobre o meio ambiente, como por exemplo desestimulando o crescimento do tráfego motorizado (EUROFORUM, 2007). O grande desafio da mobilidade urbana é encontrar formas de

satisfazer a demanda de transporte e mobilidade de forma ambientalmente correta, socialmente justa e economicamente viável (OECD, 1996).

O *World Business Council for Sustainable Development*, que é uma parte do *Mobility Project 2030* define a mobilidade urbana sustentável como “a capacidade de satisfazer a necessidade da sociedade de se mover livremente, obter acesso, comunicar, trocar e estabelecer relações sem sacrificar outros valores humanos ou ecológicos essenciais, hoje ou no futuro” (WBCSD, 2015; p. 11). Essa definição é destrinchada em princípios que devem pautar o planejamento de estratégias de transporte, são eles: preservar o ambiente natural; manter a saúde e a segurança humana; atender às necessidades de deslocamento das pessoas; dar suporte a uma boa economia; minimizar os custos com transporte para o acesso e mobilidade; minimizar custos de infraestrutura; garantir a segurança energética; e ser viável economicamente no longo prazo. Esses fatores dão suporte à elaboração de políticas e estratégias de mobilidade, e tem uma característica multi setorial (WILLIAMS, 2007). Algumas premissas devem ser levadas em consideração quanto trata-se de transporte sustentável. Primeiramente, o setor de transportes é composto por muitos subsistemas técnicos e sociais que produzem tanto benefício social, quanto danos ambientais. Além disso, o setor não está isolado do resto da sociedade, portanto para que haja sustentabilidade nesse sistema, deve haver mudanças em vários outros sistemas econômicos (GUDMUNDSSON, 2004).

O conceito de desenvolvimento sustentável, que preconiza que a geração atual não pode comprometer as gerações futuras de suprirem suas necessidades, também é relevante perante a questão dos transportes, porque os padrões de crescimento e projeções futuras indicam que o setor de transporte tende a se tornar insustentável em termos de recursos econômicos e ambientais limitados. Além disso, o movimento de pessoas e bens atende a sociedade atual, pressionando o meio ambiente em termos locais, como a poluição do ar, e também na escala global, devido às emissões de gases de efeito estufa (GUDMUNDSSON, 2004). Em termos de economia, deve-se considerar fatores relacionados aos custos, e as contribuições do sistema de transporte ao crescimento e desenvolvimento da economia local e regional (MILLER et al, 2016).

A mobilidade está relacionada à sustentabilidade considerando dois principais pontos: a oferta de transporte e a qualidade ambiental. A mobilidade urbana

sustentável reflete então a gestão correta dos transportes (CAMPOS, 2006). A Política Nacional de Mobilidade Urbana Sustentável considera a mobilidade urbana sustentável como o resultado de políticas que priorizam o modo coletivo sobre o individual, o não-motorizado sobre o motorizado, que contribuam para a inclusão social por meio da acessibilidade ao espaço urbano e favoreçam o meio ambiente (BRASIL, 2004).

A mobilidade urbana sustentável surge como elemento-chave para garantir o acesso democrático à cidade e ao transporte público, que deve valorizar a acessibilidade universal e os deslocamentos de pedestres e ciclistas, em segurança. A acessibilidade do serviço de transporte para trabalho e demais atividades também é importante. Esses fatores irão contribuir para a qualidade de vida da população, tanto quanto demais serviços urbanos. A dimensão social do transporte também inclui a questão da saúde. Diversos estudos medem os impactos na saúde humana em termos de emissões de gases e partículas nocivas, em vista que as emissões advindas de todos os tipos de transporte motorizados trazem riscos à saúde humana (COSTA, 2008; MILLER et al, 2016).

Em termos de curto e longo prazo, melhorias na mobilidade urbana trazem resultados em variáveis relevantes do cenário urbano considerando o desenvolvimento sustentável, conforme o Quadro 1. Por exemplo, a qualidade do ar já pode ser percebida pela geração presente, assim como a redução do tempo de viagem e de congestionamentos. Considerando as gerações futuras, ou seja, o longo prazo, alcança-se a conservação de recursos não-renováveis, a viabilidade econômica e a equidade de diversas gerações na mobilidade.

Quadro 1: Visão geral sobre as questões do transporte sustentável.

| | Meio ambiente | Economia | Sociedade |
|---------------------------------------|---|---|---|
| Desenvolvimento (curto prazo) | Qualidade do ar; Poluição sonora; Poluição da água; Poluição e dejetos; Qualidade de vida | Mobilidade e acessibilidade; Tempo de viagem e congestionamentos; Custos por viagem; Custos de infraestrutura; Custos de consumo; Barreiras de mobilidade. | Segurança; Equidade na mobilidade e no acesso; Impactos sobre a saúde; Coesão da comunidade. |
| Sustentabilidade (longo prazo) | Mudanças climáticas; Proteção à biodiversidade e aos ecossistemas; Impactos hídricos; Degradação ecológica e habitacional; Uso da terra; Esgotamento dos recursos. | Reinvestimentos em transportes; Inovações nos transportes; Esgotamento de recursos não-renováveis. Viabilidade econômica. | Equidade na acessibilidade ao longo de gerações; Impactos da desvantagem da mobilidade; Coesão da comunidade. |

Fonte: Gudmundsson (2004) e Litman e Burwell (2006), adaptado pela autora.

A mobilidade urbana está diretamente atrelada à oferta e à escolha do transporte. Dessa forma, em relação à economia, os custos de consumo e de infraestrutura também devem ser considerados. Sobre a sociedade, deve ser ofertada de forma igual, acessível a todos e deve garantir a coesão da comunidade. Em relação ao meio ambiente, deve reduzir os efeitos sobre a poluição do ar, sonora e hídrica, e sobre o esgotamento de recursos não-renováveis. As ferramentas de avaliação do transporte devem incluir o conceito de ecoeficiência (referente ao aumento da produção econômica sem aumento equivalente de danos ambientais) e a necessidade de corrigir falhas de mercado, internalizando custos ambientais externos nos preços dos transportes (GUDMUNDSSON, 2004). Esse conceito deve ser aplicado na gestão urbana em todas suas diretrizes a fim de se alcançar a sustentabilidade do sistema como um todo.

O WBCSD (2015) estabelece quatro dimensões relacionadas à mobilidade urbana sustentável: ambiente global; qualidade de vida; sucesso econômico; e sistema de mobilidade. O ambiental global refere-se a uma escala global e de longo prazo, uma vez que os impactos de mobilidade de uma cidade ocorrem também fora de seus limites

geográficos. O espaço necessário para mobilidade, as emissões de gases de efeito estufa, o nível de eficiência energética e as oportunidades para a mobilidade ativa também estão relacionadas a essa dimensão. A qualidade de vida refere-se à escala local e de curto prazo, uma vez que trata de impactos mais diretos na vida dos habitantes e questões sociais, com saúde, fatalidades e segurança. Essa dimensão também aborda a equidade do acesso, pois a mobilidade urbana sustentável deve oferecer seus serviços a todos os grupos da cidade com a mesma qualidade. O sucesso econômico refere-se à economia da escala da cidade, como diversidade funcional urbana, finanças públicas, financiamento para mobilidade e uso do espaço de mobilidade. O sistema de mobilidade urbana deve ser analisado em termos de insumos externos (recursos e materiais) e suas saídas (impactos). O desempenho do sistema de mobilidade vai depender das consequências das entradas e saídas nas outras três dimensões da mobilidade urbana sustentável.

Indicadores são muito utilizados na análise de políticas, inclusive as ambientais. Indicadores trazem informações conforme sua natureza, que pode ser:

- Indicadores descritivos: informam o estado atual de algum padrão ou nível (exemplo: emissões de CO₂ do transporte da Europa);
- Indicadores de desempenho: comparam o estado ou tendência a um determinado padrão ou norma (exemplo: número de moradias afetadas pelos ruídos acima do indicado);
- Indicadores de eficiência: combinação de tendências descritivas relacionadas (exemplo: eficiência média de combustível dos automóveis);
- Indicadores de eficácia política: o papel das políticas nas mudanças observadas (exemplo: efeito da legislação do limite de emissões nos veículos motorizados);
- Índices que agregam vários indicadores em uma mensagem (exemplo: a combinação de vários poluentes do ar em índices de acidificação ou aquecimento global).

Em termos de operacionalização dos indicadores, deve-se considerar: prestação de uma imagem representativa; simplicidade; respostas às mudanças; fundamentação teórica em termos técnicos e científicos; aderência a padrões internacionais e locais; atualização com regularidade; medição e atualização por meio de procedimentos e fontes confiáveis (GUDMUNDSSON, 2004).

O WBCSD (2015) estabelece 19 indicadores que ajudam a descrever a sustentabilidade da mobilidade das cidades, expostos no Quadro 2. Esses indicadores podem impactar em uma ou mais dimensões a mobilidade urbana, como por exemplo, o congestionamento aumenta a poluição do ar. Isso significa que possuem relações diretas e indiretas entre si, de forma a afetar as dimensões da mobilidade. Por exemplo, o tempo de viagem está relacionado ao sucesso econômico pois há perda econômica (falta de produtividade) a cada minuto que os trabalhadores estão parados no trânsito. Oportunidade econômica está definida aqui como a acessibilidade a locais de emprego e educação, que fomenta o sucesso econômico. Diversidade das funcionalidades urbanas impacta na qualidade de vida pois reflete a proximidade a diversos serviços como lazer, cultura e comércio. O espaço pode ser um recurso escasso na cidade, portanto dependendo de como ele é utilizado pode reduzir a produtividade de um determinado local.

Diversos indicadores mencionados no Quadro 2 estão relacionados à dimensão da qualidade de vida. Eficiência energética e congestionamentos estão relacionadas às emissões de GEE, que alteram o meio ambiente de forma global. Em termos de alterações climáticas globais, os sistemas de transporte costumam ser os mais participativos considerando as emissões de gases nocivos. Quanto mais ineficiente, maior a quantidade de gases emitidos. (MILLER et al, 2016). Dessa forma, percebe-se a interdependência dessas variáveis, o que torna possível perceber como algumas estratégias podem melhorar ou piorar determinados sistemas. Por exemplo, a implementação de um BRT pode reduzir o congestionamento, conseqüentemente reduzir as emissões de GEE, os níveis de poluição e o tempo de viagem.

Quadro 2: Indicadores de mobilidade urbana sustentável em termos de ambiente global, qualidade de vida, economia e sistema de mobilidade.

| Indicadores de mobilidade urbana sustentável | Dimensão relacionada |
|--|-----------------------------|
| Acessibilidade do transporte público a grupos de baixa renda | Sistema; Qualidade de vida |
| Acessibilidade para mobilidade de grupos prejudicados | Sistema; Qualidade de vida |
| Emissões de poluentes do ar | Qualidade de vida |
| Impedimento de ruído | Qualidade de vida |
| Fatalidades | Qualidade de vida |
| Acesso aos serviços de mobilidade | Qualidade de vida; Economia |
| Qualidade do espaço público | Qualidade de vida; Economia |
| Diversidade das funcionalidades urbanas | Qualidade de vida; Economia |
| Tempo de viagem | Qualidade de vida; Economia |
| Oportunidade econômica | Qualidade de vida; Economia |
| Rede de financiamento público | Economia |
| Uso do espaço de mobilidade | Ambiente global; Economia |
| Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) | Ambiente global |
| Congestionamentos e atrasos | Ambiente global; Sistema |
| Eficiência energética | Ambiente global; Sistema |
| Oportunidade por mobilidade ativa | Ambiente global; Sistema |
| Integração da intermodalidade | Sistema |
| Conforto e prazer | Sistema; Qualidade de vida |
| Segurança | Sistema; Qualidade de vida |

Fonte: WBCSD, 2015; p. 13. Traduzido pela autora.

Diante dessa diversidade de variáveis em relação à mobilidade urbana nas cidades, o Índice de Mobilidade Urbana Sustentável – IMUS (Costa, 2008) foi desenvolvido como uma ferramenta de análise multicritério, que avalia indicadores de mobilidade urbana divididos em diversos níveis hierárquicos de critérios, na ordem: domínio; tema e suas dimensões (social, econômica, ambiental); e por fim os indicadores. Esses indicadores foram selecionados com base em sistemas de indicadores urbanos brasileiros e internacionais, e também obtido por meio de *workshops* com especialistas e gestores, realizados nas cidades brasileiras pesquisadas. O IMUS aborda nove Domínios, são eles: acessibilidade; aspectos ambientais; aspectos sociais; aspectos políticos; infraestrutura de transportes; modos não-motorizados; planejamento

integrado; tráfego e circulação urbana; sistemas de transporte urbano. Em relação ao Domínio - Aspectos Ambientais, o IMUS traz como indicadores:

- Tema – Controle de impactos no meio ambiente: emissões de GEE; população exposta ao ruído de tráfego; estudos de impacto ambiental; consumo de combustível.
- Tema – Recursos naturais: consumo de combustível; uso de energia limpa e combustíveis alternativos.

2.2.1 Estratégias de transição

Por questões estratégicas, as recomendações internacionais para o desenvolvimento sustentável sugerem que deve haver maior integração entre economia e meio ambiente na tomada de decisões em relação à mobilidade, e também maior envolvimento da sociedade civil nesse processo. As agendas políticas locais também têm apontado para esse tipo de estratégia. Essa integração surge como solução para problemas críticos do transporte, como a mudança para novas tecnologias e fontes de energia alternativa, de forma a otimizar a organização dos fluxos de transporte, reduzindo o congestionamento urbano, a poluição atmosférica e os ruídos. Essas estratégias têm sido apontadas como alavancas-chave para um transporte mais sustentável (GUDMUNDSSON, 2004).

Para reduzir os impactos ambientais causados pela mobilidade urbana, novas alternativas e significados de transportes são necessários na sociedade e na economia. Nos últimos anos, os biocombustíveis têm sido vistos como a principal opção, mas então a avaliação de ciclo de vida mostrou possíveis danos causados por essa forma de desenvolvimento. Recentemente, o interesse público se voltou para a mobilidade elétrica. Dessa forma, é necessário conhecer os verdadeiros impactos ambientais dessa tecnologia. Isso inclui a modelagem do sistema para verificar o aumento necessário no fornecimento de eletricidade e também da fabricação das baterias (FRISCHKNECHT; FLURY, 2011).

Segundo Vasconcellos (1996), os impactos ambientais dos transportes estão relacionados aos prejuízos na construção da estrutura, a congestionamentos, à paisagem urbana, à produção de resíduos, ao consumo de energia, dentre outros. Em

relação à economia, o setor de transporte está relacionado com todas as atividades econômicas (USÓN et al, 2011). No entanto, o investimento no setor, no Brasil, é considerado baixo, apesar de haver uma demanda latente por melhorias. Essas transições devem estar voltadas para: mobilidade elétrica; intermodalidade; inovação no transporte público; e eficiência energética (MARX et al, 2015).

O setor de transportes brasileiro possui alta representatividade do modal rodoviário, tanto para o transporte de cargas quanto de pessoas: 61% e 96%, respectivamente (ANTT, 2010). Esse fator representa uma consequência de um processo histórico de investimentos nessa forma de transporte. Essa estratégia de desenvolvimento traz consequência até hoje. Segundo Moeinaddini, Asadi-Shekari e Shah (2015), o aumento do investimento em infraestrutura rodoviária contribuiu para o aumento do uso de carros, aumentando congestionamentos e muitas vezes contribuindo para a insustentabilidade dos sistemas de mobilidade.

A diversidade modal surge como uma das soluções para aumento da eficiência em mobilidade e uso da energia. Essa diversidade está relacionada à matriz modal, que significa a variedade de modos de transporte ofertados, como o rodoviário, metroviário e ciclovário, e suas subdivisões como carros, ônibus, *Bus Rapid Transit* (BRT), metrô, Veículo Leve sobre Trilhos (VLT), trem, bicicleta dentre outros (VASCONCELLOS, 2011). Essa oferta variada de modos de transporte deve estar integrada. Esse fator é importante porque considerando que os fluxos de tráfego são multidirecionais e que o ambiente físico da cidade é variável (uso misto do solo), a sustentabilidade dos sistemas de transporte urbano será alcançada pela alteração de modais (UNITED NATIONS - HABITAT, 2013).

Os serviços de transportes são considerados sensíveis às externalidades devido à sua relação direta e relevante com o desenvolvimento econômico e o bem-estar social (PECI, 2002). Segundo Negrão (2013), é necessária uma intervenção eficiente do governo na economia quando a poluição se torna uma das maiores falhas de mercado. Esse é o caso do setor de transportes, devido ao seu alto consumo energético e consequente poluição.

De acordo com Vasconcelos (2005), apesar de alguns investimentos importantes, o sistema de transporte público tem dificuldade em atender de forma adequada a demanda, além de passar por crises financeiras devido aos custos, taxas e gratuidades. Essas falhas refletem, na verdade, deficiências profundas de gestão e operação desse sistema.

2.3 Eficiência energética, mobilidade urbana e tendências

No dia 12 de setembro de 2016, o Congresso Nacional Brasileiro aderiu oficialmente ao Acordo de Paris, aprovado por 195 países na 21ª Conferência das Partes (COP21) da ONU, com o objetivo de aderir à resposta global em busca do desenvolvimento sustentável e da redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Neste Acordo, cada país deve construir seus próprios compromissos, estipulados nas “Contribuições Nacionalmente Determinadas” (NDC, sigla em inglês), também chamado de Plano de Adaptações ao Acordo de Paris (BRASIL, 2016), que se compromete a:

- Alcançar participação de cerca de 45% de energias renováveis, além da energia hídrica, na composição da matriz energética, para o ano de 2030, em relação a 2005. Essa meta inclui expandir o uso de fontes renováveis na matriz total de energia de 28% para 33% até 2030, além da hídrica, e aumentar o uso doméstico de energias renováveis no fornecimento de energia elétrica para 23% (como eólica, biomassa e solar);
- Aumentar a participação da bioenergia sustentável (etanol, biocombustíveis avançados e biodiesel na mistura do diesel) na matriz energética em até 18%, em 2030 em relação a 2005;
- Alcançar 10% de ganho em eficiência no setor elétrico até 2030;
- Restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas.

O NDC (BRASIL, 2016) considera os gases de efeito estufa: CO₂, CH₄, N₂O, perfluorcarbonos, hidrofluorcarbonos e SF₆. Dessa forma, espera-se reduzir as emissões de GEE em 37%, comparando 2005 a 2025, e em 66% em relação à intensidade de emissões (emissão por unidade de PIB) considerando o mesmo período. Para o ano de 2030, espera-se reduzir esse indicador em 75%. São metas ambiciosas considerando que

há um crescimento populacional contínuo, assim como a renda per capita dos brasileiros.

Em relação ao setor de transportes, o NDC do Brasil sugere que os governos locais devem se engajar no combate às mudanças do clima e “promover medidas de eficiência, melhorias na infraestrutura de transportes e no transporte público em áreas urbanas”.

Os esforços para enfrentar a questão da mudança do clima e seus efeitos visa reduzir a vulnerabilidade das populações e prover serviços ecossistêmicos através da gestão do conhecimento, do investimento em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias, do desenvolvimento de ferramentas e estratégias de adaptação em diferentes níveis de governança. Considerando que a população brasileira está mais concentrada nas cidades, as políticas públicas de adaptação ao Acordo de Paris devem considerar também os sistemas urbanos de habitação, saúde, saneamento e transporte (BRASIL, 2016).

Barczak e Duarte (2012) enumeram cinco categorias de medidas mitigadoras relacionadas aos impactos ambientais da mobilidade urbana: econômico-fiscais; regulatórias; informação e comunicação; planejamento urbano; tecnológicas. Medidas tecnológicas podem ajudar a reduzir as emissões advindas desse setor. A introdução de combustíveis e tecnologias limpas e os melhoramentos nos níveis de eficiência energética podem ser consideradas medidas estruturantes porque interferem nos processos de produção e consumo de energia, e, portanto, de emissões. Dessa forma, Bartolozzi, Rizzi e Frey (2013), consideram que a ligação entre o setor de energia e o de energias renováveis poderá trazer diversos benefícios ambientais e nível local e global, embora ainda haja incapacidade em utilizar uma grande parte da energia disponível.

Para analisar a performance do transporte público em termos de energia, deve-se considerar o montante total de energia necessária para mover os veículos e os passageiros. Um sistema de transporte sustentável deve reduzir o seu consumo de energia. Portanto, o consumo de energia por unidade de mobilidade deve ser calculado. A energia consumida deve ser padronizada em uma distância percorrida por passageiro (MILLER et al, 2016).

Sobre os cálculos relacionados ao consumo de energia e combustíveis, recomenda-se selecionar as variáveis de maior impacto econômico e ambiental (WEINBERG; KALTSCHMITT, 2013). Indicadores de sustentabilidade devem refletir como uma determinada sociedade utiliza seu meio ambiente. O Quadro 3 mostra alguns indicadores: combate às alterações climáticas - emissões de gases de efeito estufa, porcentagem de energias renováveis no consumo de eletricidade; garantir transporte sustentável - passageiros transportados por quilômetro e toneladas transportadas por quilometro; abordagem de ameaças à saúde pública – exposição da população urbana à poluição do ar; gerenciamento dos recursos naturais – resíduos municipais coletados, depositados e incinerados em kg por habitante; intensidade da energia da economia – consumo de energia por PIB (GUDMUNDSSON, 2004).

Quadro 3: Indicadores de eficiência em mobilidade urbana, divididos em categorias:

| Categoria | INDICADOR |
|---|---|
| Consequências ambientais do transporte | Consumo total de energia do sistema de transporte, dividido no total por modal e por combustível; Emissões de gases de efeito estufa (CO ₂ e N ₂ O) por modal; Emissões de poluentes do ar por modal; % da população exposta a ruídos, por categoria de ruído e por modal; Uso do solo devido à infraestrutura de transporte, por modal. |
| Demanda e intensidade do transporte | Passageiros transportados por modal e por propósito. |
| Planejamento e acessibilidade do espaço | Tempo médio de viagem por passageiro; Comprimento para cada modal; Localização do serviço. |
| Cadeia de infraestrutura e serviços | Capacidade da rede de infraestrutura de transportes, por modal e por tipo de estrutura (rodoviário, ferroviário etc); Investimento em infraestrutura por modal. |
| Preços e custos de transportes | Custo do passageiro por modal; Taxas e preços de combustíveis; Montante total de custos externos por modal; custo por passageiro/km e por tonelada/km por modal; Subsídios. |
| Tecnologia e eficiência | Eficiência energética global por passageiros (por passageiro/km e por tonelada/km) por modal; Emissões por passageiro/km e emissões por tonelada/km Taxa de ocupação dos veículos; Utilização de fontes de energia limpa (elétrica, biocombustíveis etc); Resíduos de veículo (fim do ciclo-de-vida); Frota de veículos; Idade média da frota de veículos; Padrões de emissão de ruído, por modal. |

Fonte: Gudmundsson, 2004. Adaptado pela autora.

Obviamente não se deve supor que os indicadores irão fornecer a resposta e a solução a um problema denso. Eles servem para orientar a análise de sistemas complexos, reduzindo a complexidade da operação, da comunicação e da solução.

O *World Business Council for Sustainable Development* (2015) afirma que a eficiência do sistema de mobilidade de pessoas deve ser calculada em termos de eficiência energética, dado a partir do total de energia consumida pelo sistema de certa cidade ou região. O parâmetro pode ser o total de energia utilizada por passageiro quilômetro, e total de energia utilizada por tonelada quilômetro (média anual em todos os modos) e deve ser calculado com os parâmetros de intensidade de energia. Esse indicador representa o quanto cada modal consumiu de combustível por unidade de quilômetros, e por unidade de passageiro transportado por quilômetro, por cada modal. O indicador relaciona o consumo final de energia com o desempenho do transporte, pois está relacionado ao passageiro e à tonelada-quilômetro (portanto o impacto do encurtamento das distâncias não é levado em consideração). Outro fator que deve ser levado em consideração é que o indicador se concentra nos recursos energéticos para veículos em movimento, e não considera o uso de outros recursos e a energia utilizada para produção dos veículos, pois está fora do alcance da governança urbana.

Outro indicador importante deve considerar a quilometragem de veículo per capita, que mede a distância do veículo percorrida por habitante. É um parâmetro importante pois permite avaliar a eficiência da rede de mobilidade em termos de distância percorrida e taxa de ocupação de veículos. A eficiência em relação à distância pode fornecer informações se as funções urbanas estão bem distribuídas pela cidade, e a taxa de ocupação pode sugerir se o sistema sofre de congestionamentos por excesso de veículos e ou por falta de estrutura.

2.4 Ecologia Industrial, ACV e a mobilidade urbana

De uma forma geral, a avaliação de ciclo de vida é uma técnica de diagnóstico de desempenho e gestão ambiental, que determina os impactos ambientais de um produto ou sistema ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a produção, ao uso e à eliminação, codificado pelos padrões ISO 14040. Essa técnica é dividida em 4 etapas: (1) definição do objetivo e do escopo – unidade funcional, limites do sistema, quantidade e qualidade

dos dados, pressupostos e limites e questões ambientais a serem consideradas; (2) análise do inventário do ciclo de vida (LCI) é a etapa de coleta de dados; (3) avaliação do impacto do ciclo de vida (LCIA) – etapa em que se avaliam os efeitos sobre os problemas ambientais escolhidos em termos de consumo de recursos e emissões de poluentes, de forma a mensurar os riscos ambientais daquele sistema ou produto; (4) interpretação do ciclo de vida, que tem como objetivo destacar pontos críticos e propor mudanças para reduzir os danos ambientais causados.

Segundo Graedel (2001), o impacto significativo do sistema de transporte está nos níveis mais elevados, considerados a estrutura social e as tecnologias de infraestrutura. Sobre a estrutura social, o autor analisa a realidade dos mercados envolvidos. Sobre as tecnologias de infraestrutura, ele avalia: a questão da energia necessária; áreas naturais que são destruídas; materiais necessários; e o impacto do setor de petróleo, visto que a maioria dos combustíveis utilizados provém dessa matéria-prima. O uso do carro tem forte influência sobre esse aspecto, devido a questões técnicas (emissões e geração de resíduos) e fatores culturais que incentivam o uso desse tipo de transporte. Dessa forma, é importante avaliar a mobilidade urbana sob o ponto de vista energético (fonte de energia e conseqüente poluição) e sobre a diversidade modal, pois refletem soluções estratégicas para problemas graves.

A utilização indiscriminada do modo de transporte individual acarreta custos sociais, ambientais e econômicos (PONTES, 2010). Considerando a avaliação do ciclo de vida, o uso desse tipo de transporte apresenta domínio relevante sobre: 1) os impactos ambientais devido ao gasto de energia; 2) a quantidade de material utilizada e sua capacidade de transporte; e 3) consumo de combustíveis fósseis, que apresenta demanda cumulativa crescente, e tem por conseqüências a emissão de gases de efeito estufa e geração de resíduos. Dessa forma, o uso do carro acarreta em maiores custos de mobilidade, no entanto fatores culturais incentivam o uso desse tipo de transporte (GRAEDEL, 2001).

A avaliação de ciclo de vida transcende as fronteiras geográficas e políticas em sua análise sobre processos diretos e indiretos da cadeia de produção. Esse tipo de ferramenta é importante pois as viagens locais dos veículos de uma cidade

desencadeiam o uso de energia e as emissões de fora desse local. A operação dos veículos e os efeitos de eletricidade de propulsão representam uma grande parcela do consumo de energia, das emissões de GEE, e ocorrem na escala local, enquanto a produção de energia (extração e fabricação do combustível) e a fabricação ocorrem de forma remota (CHESTER et al, 2013).

Os carros elétricos surgem como uma das alternativas ao transporte sustentável, por utilizarem uma fonte de energia limpa. No entanto, os custos de implementação, tecnologia e inovação em relação a esse transporte são considerados altos, mas esses custos tendem a reduzir no longo prazo (WEINBERG; KALTSCHMITT, 2013). Ribeiro et al (2007) concluíram utilizando a análise que considera o ciclo total da energia (desde a sua produção até o uso), que os veículos elétricos possuem maior eficiência energética (90%) e emitem muito menos gases de efeito estufa (50%) que os veículos convencionais atualmente. A eletrificação do sistema de transporte parece ser uma solução promissora, em termos de emissões de GEE e por reduzir a dependência de combustíveis fósseis nesse sistema. A mobilidade elétrica parecer ser cada vez mais benéfica quando comparada à mobilidade convencional, sob o ponto de vista ambiental e econômico (FARIA et al, 2012).

O 43º Fórum de Avaliação de Ciclo de Vida listou as principais variáveis que impactam no desempenho ambiental da condução de automóveis elétricos: peso do carro; produção e desempenho da bateria; dinâmica tecnológica (produção e desempenho da bateria e melhorias na eficiência dos motores de combustão interna); dinâmica social (redução da demanda por mobilidade, mudanças para conceitos de mobilidade alternativa); mudança da simbologia relativa ao automóvel (FRISCHKNECHT; FLURY, 2011).

Recentemente, o Parlamento Europeu aprovou uma lei sobre homologação de veículos movidos a hidrogênio como uma forma de proteger o meio ambiente das cidades. A lei se aplica ao desenvolvimento de células de combustível, ao desenvolvimento de estações de abastecimento, e à diretriz de se produzir esse combustível de maneira sustentável. Dessa forma, a mistura de hidrogênio e metano pode ser um passo de transição para trazer o hidrogênio ao sistema de mobilidade

urbana. Essa mistura pode tornar os combustíveis fósseis obsoletos, implementando uma fonte de energia limpa (BRIGUGLIO et al, 2010).

Os veículos movido a gás natural, apesar de emitirem menos CO₂, emitem muito gás metano (CH₄), que apresenta segunda maior participação no efeito estufa (BARCZAK; DUARTE, 2012).

Em relação aos biocombustíveis, há o *trade-off* entre o mercado de produção de alimentos, e também a questão da alta intensidade de capital de investimentos. A eletricidade e o hidrogênio surgem como alternativas mais interessantes devido ao impacto nas emissões e no potencial de integração com as energias renováveis. A avaliação da sustentabilidade ambiental dessas alternativas deve levar em consideração todo o seu ciclo de vida, que inclui desde a produção, armazenamento, distribuição e utilização final (BARTOLOZZI; RIZZI; FREY, 2013).

O setor de transportes tem relevância na questão das emissões de poluentes do ar, no entanto devido ao fato dos contaminantes do ar das cidades serem emitidos por diversas fontes, fica difícil quantificar de onde exatamente provém essas emissões dentro do espaço urbano. Portanto, o fator de contaminação do ar deve ser analisado em termos do ciclo de energia (KENNEDY; CUDDIHY; ENGEL-YAN, 2007).

De acordo com Chester e outros (2013), o sistema de transporte é criado através de uma série de programas e autoridades federais, estaduais, regionais e locais que atuam de forma independente, porém interdependente. O projeto de uma estrutura de políticas para reduzir as emissões do ciclo de vida é, portanto, uma tarefa complexa e uma variedade de opções políticas podem ser viáveis. Embora não haja uma solução política simples, as estratégias de mitigação que incorporem efetivamente a ACV no planejamento de transporte devem envolver todos os seguintes itens:

- Mudança de critérios analíticos e de decisão para a seleção de projetos;
- Melhorar a capacidade de comparar diferentes modos de transporte entre si em processos de planejamento e financiamento de projetos;
- Melhorar a capacidade de realizar análises de impactos ambientais complexos no planejamento de transporte antes que a seleção do projeto

ocorra (ou seja, não apenas em avaliações de impacto ambiental pós-dezembro);

- Melhorar a integração analítica em diferentes escalas espaciais e temporais;
- Criar estratégias de compras que enfatizem o uso de produtos e materiais com maior conteúdo reciclado e estabelecer relacionamentos com fornecedores que instituíram medidas de eficiência.

Um estudo de caso na cidade de Los Angeles buscou analisar em termos de Avaliação de Ciclo de Vida como a implementação de novos sistemas de transporte público na cidade poderia ajudar a reduzir as emissões de GEE, para atingir novos padrões emissões. O estudo concluiu que apesar de haver redução das viagens por automóveis, o que reduziria o consumo de energia futura e as emissões dos veículos pessoais, os processos de construção dessa nova estrutura, em termos de ciclo de vida, iriam emitir muitos gases nocivos assim como consumir muita energia (CHESTER et al, 2013).

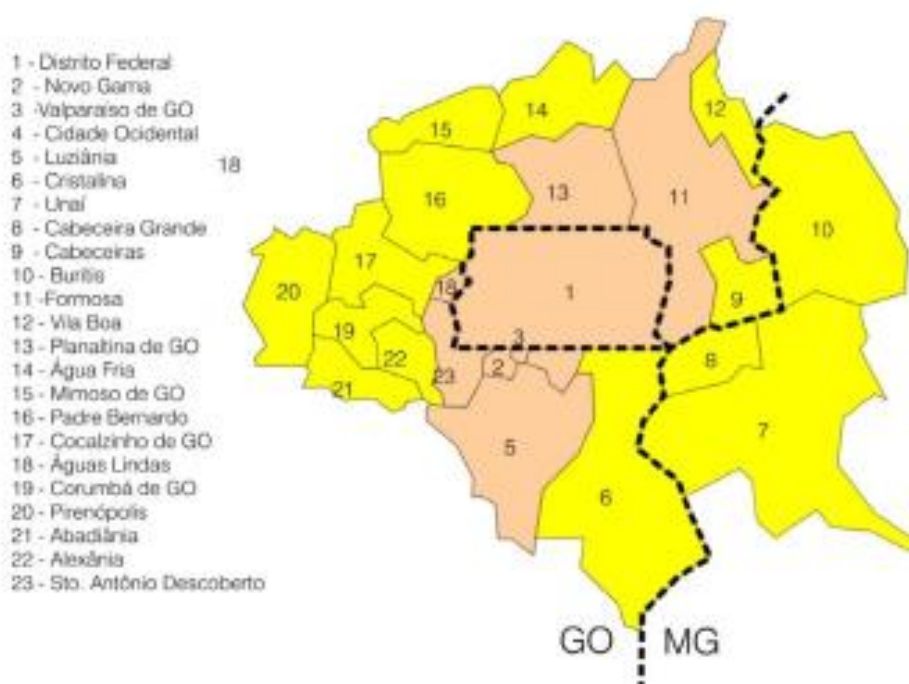
A Análise do Ciclo de Vida é uma ferramenta útil para este estudo pois pode considerar as variáveis desejadas: consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa (GEE). O conceito de eco eficiência está integrado nessa ferramenta, e é importante para estimular a criatividade e inovação nos sistemas produtivos, indicando qual o caminho mais interessante a ser seguido além de uma visão de todo o processo. Portanto, será possível ter conhecimento sobre os custos e valores consumidos em cada etapa do ciclo de vida, além dos valores a serem desperdiçados (USÓN et al, 2011). Ao aplicar essa ferramenta, avalia-se uma abrangente gama de indicadores ambientais. Dessa forma, as compensações não intencionais (reduzir um impacto, mas aumentar outro) podem ser identificadas precocemente, assim como torna-se possível desenvolver estratégias de mitigação mais adequadas (CHESTER et al, 2013).

3 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO

Considerando que o objetivo dessa pesquisa é “analisar estratégias de mobilidade urbana em termos de eficiência energética e emissões de GEE, utilizando avaliação de ciclo de vida (ACV)”, este estudo irá considerar o Plano de Diretor de Transporte Urbano e Mobilidade do DF – PDTU/DF, uma vez que este plano é uma obrigatoriedade do Estatuto das Cidades, que determina que toda cidade com mais de 500 mil habitantes deve elaborar suas estratégias de planejamento e gestão da mobilidade urbana em acordo com a Política Nacional de Mobilidade Urbana, do Ministério das Cidades. O PDTU “fundamenta-se na articulação dos vários modos de transporte com a finalidade de atender às exigências de deslocamento da população, buscando a eficiência geral do Sistema de Transporte Urbano, privilegiando os modos não motorizados e coletivos” (GDF, 2010).

O PDTU/DF é gerido pela Secretaria de Transportes do Distrito Federal e mostra algumas projeções futuras para o sistema de mobilidade urbana do DF com base em indicadores de crescimento demográfico, ocupação do território, localização de empregos e crescimento econômico. Para cálculo das projeções futuras, também foi realizada Pesquisa de Origem e Destino com base domiciliar, além de pesquisas complementares para cálculo das redes de simulação de automóveis e transporte coletivo. Conforme apresentado na Figura 1, o Plano possui como área de abrangência o Distrito Federal e oito municípios do estado de Goiás: Águas Lindas de Goiás, Santo Antônio do Descoberto, Novo Gama, Valparaíso de Goiás, Cidade Ocidental, Planaltina de Goiás, Luziânia e Formosa.

Figura 1: Área de abrangência do PDTU-DF.



Fonte: PDTU (GDF, 2010), p. 10.

O PDTU (GDF, 2010) elaborou quatro alternativas de cenários de transportes, e cada alternativa possui projeções para os anos de 2010 e 2020, são elas:

- ✓ Alternativa Nada a Fazer;
- ✓ Alternativa 1A;
- ✓ Alternativa 1B;
- ✓ Alternativa 2.

A alternativa Nada a Fazer representa a situação do sistema de mobilidade de pessoas em 2008 e considera os investimentos em andamento ou já comprometidos. Dessa forma, essa alternativa é composta pelos sistemas rodoviário e ferroviário (metrô) e pelo serviço semiurbano.

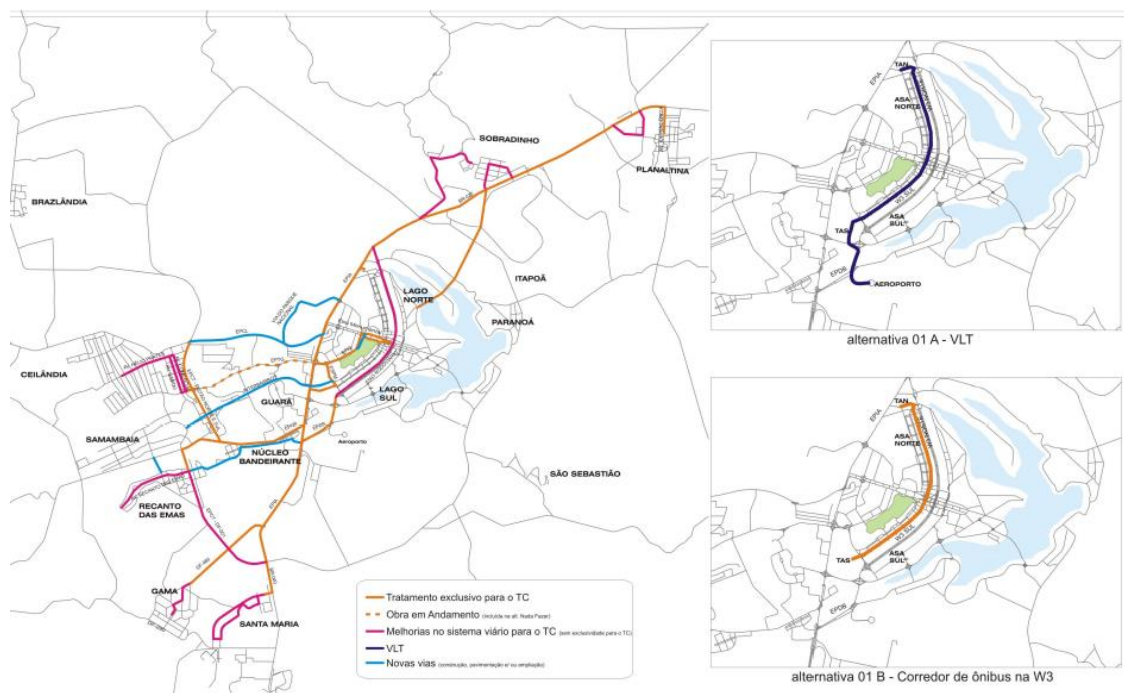
As alternativas 1A e 1B inclui as modificações físicas e operacionais propostas para o sistema de mobilidade urbana do DF. A Alternativa 1A considera:

- Adoção de modelo operacional tronco-alimentado, com integração operacional e tarifária;
- Tratamento prioritário para ônibus nos principais corredores de transporte;
- Implantação dos Eixos de Transporte Oeste, Sul, Sudoeste, Leste e Norte;

- Implantação da linha do Metrô Leve (VLT) ligando o Aeroporto JK ao Terminal Asa Sul e ao Terminal Asa Norte;
- Aumento da capacidade operacional do metrô, com incremento da frequência de viagens e abertura de novas estações;
- Implantação de novos terminais de ônibus e de pontos de paradas /estações;
- Implantação de investimentos viários para aumento de capacidade nos principais corredores de transporte ou para complementação da rede viária, sobretudo em áreas urbanas.

A alternativa “1B” difere da “1A” pela substituição da tecnologia de transporte a ser utilizada na Via W3, passando de ferroviária (VLT) para rodoviária operando em faixa exclusiva. As diferenças podem ser vistas na Figura 2.

Figura 2: Intervenções nas Alternativas 1A e 1B.

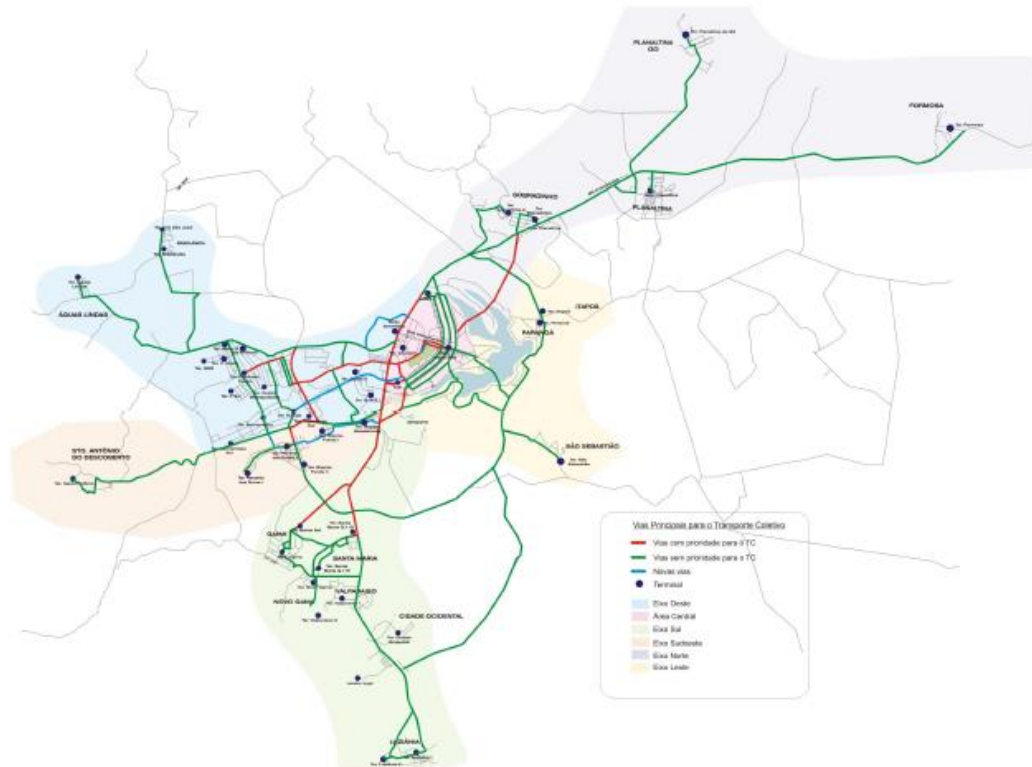


Fonte: PDTU (GDF, 2010, p. 121).

Com relação ao Entorno do Distrito Federal, foi prevista a reorganização do serviço semiurbano, não integrado ao serviço básico do STPC/DF. A alternativa 2 considera investimentos adicionais no sistema ferroviário, além da proposta prevista na alternativa 1A, de acordo com a Figura 3. As linhas semiurbanas, que ligam o Entorno ao Distrito Federal, seriam integradas física e operacionalmente ao serviço básico do

STPC/DF. Os investimentos ferroviários previstos consideram a extensão das linhas do metrô em Ceilândia, Samambaia e Asa Norte, e a implantação da linha 2 do VLT no Eixo Monumental. Com relação ao sistema viário, foram previstas intervenções para aumento de capacidade nos principais corredores e para complemento da rede viária em áreas urbanas.

Figura 3: Intervenções na Alternativa 2.



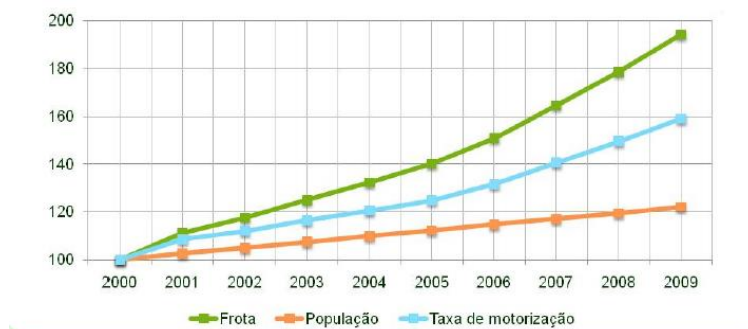
Fonte: PDTU (GDF, 2010), p. 123).

O PDTU (GDF, 2010) considera cenários futuros elaborados com base em dados de tendência do padrão atual da população e mobilidade. Dentre as mudanças mais significativas elaboradas, a que foi implementada com maior êxito diz respeito à construção de quase 600 km de ciclovias.

De acordo com o Departamento de Trânsito do Distrito Federal (DETRAN/DF), o Distrito Federal, no final de 2009, contava com 1.138.127 veículos registrados. A frota aumentou 74% de 2001 a 2009. A taxa de motorização reflete o número de veículos para cada 100 habitantes, e mostra de forma proporcional a quantidade de veículos em relação ao número de habitantes. De acordo com o Gráfico 1 e o Gráfico 2 a taxa de

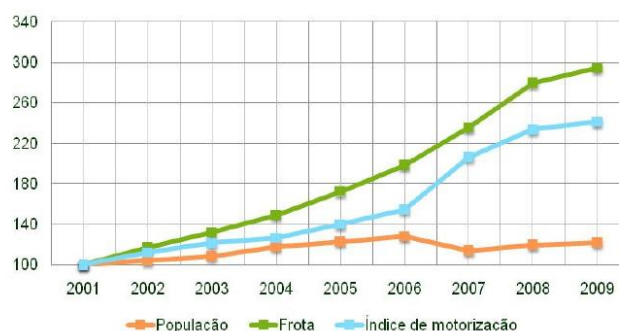
motorização do DF e Entorno aumentou com o passar dos últimos anos, conforme pode ser visto abaixo.

Gráfico 1: Taxa de motorização do DF, de 2000 a 2009.



Fonte: PDTU (GDF, 2010; p. 20).

Gráfico 2: Taxa de motorização do Entorno, de 2001 a 2009.



Fonte: PDTU (GDF, 2010; p. 21).

Os gráficos mostram uma população e uma frota crescente a cada ano, assim como a taxa de motorização. No período indicado, o crescimento da população do DF foi em torno de 22%, enquanto a frota cresceu cerca de 74%. No Entorno, a população cresceu em 21% e a frota em 180%. O PDTU explica que essa característica pode ser explicada pelo aumento da renda da população, que permite a migração do transporte coletivo para o individual.

No Distrito Federal, a atual frota de veículos motorizados rodoviários apresenta baixa diversidade, pois o automóvel representa 71% da frota, seguido das motocicletas (11%). Ônibus e micro-ônibus, somados, representam apenas 1% do total da frota (DETRAN/DF, 2016). O PDTU afirma que 41% das viagens do DF são feitas pelo transporte coletivo, enquanto 52% são feitas por transporte individual. A repartição por modo mostra que há crescimento acelerado ao longo dos anos sobre o número de viagens realizadas por carro. O aumento do tempo de viagem também é um indicador

que cresce a cada ano (evidência de congestionamentos). O transporte público atual do DF é realizado basicamente por ônibus e BRT, duas linhas de metrô (Ceilândia e Samambaia). No entanto, o metrô atende apenas uma única direção do DF. Demais regiões como Gama, Brazlândia, Sobradinho, Planaltina dentre outras, não são atendidas por esse modal.

Em 2010, o Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS) foi aplicado com o objetivo de se avaliar a mobilidade urbana do Distrito Federal (PONTES, 2010), aplicado à região de Brasília e Entorno. O valor final obtido para o IMUS do DF foi de 0,317, considerado baixo. Isso se deve ao modelo de ocupação territorial da área metropolitana, pois alguns indicadores que receberam avaliação zero estão relacionados às diretrizes de ocupação urbana, em termos de planos de projetos. Os indicadores de fragmentação urbana e densidade populacional demonstram os pontos negativos desse modelo de ocupação, assim como o Índice de Passageiro por Quilômetro (IPK). São evidências de uma região fragmentada e setorizada, o que dificulta a implementação de um sistema de mobilidade urbana mais eficiente em termos de passageiros transportados, gasto de energia e danos ambientais. A distância entre os núcleos da região, em que se concentram pontos de trabalho e estudo também torna a solução complexa, pois obriga as pessoas a percorrerem longas distâncias por dia. Mais especificamente, a organização do Plano Piloto, apesar de ter sido planejada, favorece o uso do automóvel devido à descontinuidade e dispersão do tecido urbano, e aos chamados “vazios urbanos”. Isso pode ser verificado na divisão das viagens por modo de transporte, pois na área metropolitana de Brasília, cerca de 70% das viagens são feitas por modos motorizados, enquanto que nas regiões do Entorno, muitas viagens são feitas por transporte coletivo, ou não-motorizado (bicicleta e a pé).

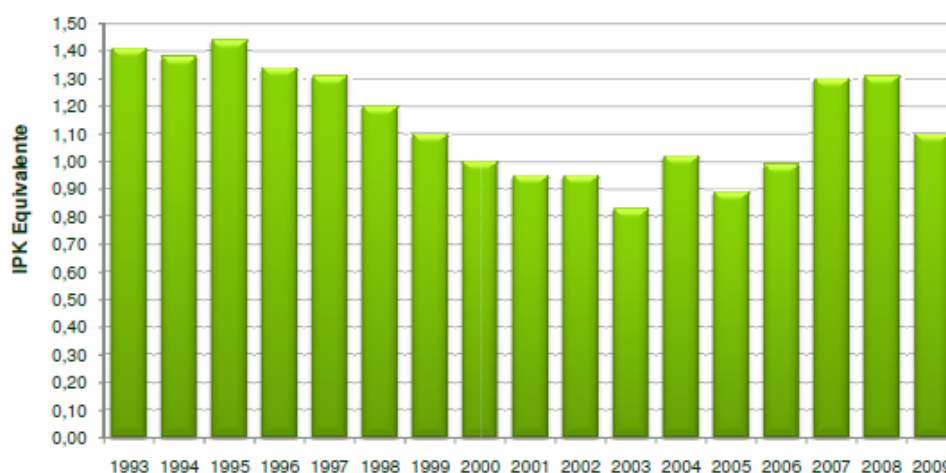
Outro indicador preocupante da mobilidade urbana do DF à época da pesquisa, e que hoje em dia continua no mesmo patamar, é a taxa de motorização. Antes era de 1,57, hoje é 1,51 (GDF, 2010). Isso significa que os automóveis circulam praticamente com apenas o motorista. Isso pode ser evidenciado no aumento de congestionamentos e tempo de viagem, além da falta de vagas, ou da necessidade de estacionamentos, em áreas de grande circulação.

Apesar de trazer resultados relevantes para a mobilidade urbana do DF e Entorno, o IMUS-DF aplicado por Pontes (2010) não pôde calcular alguns indicadores ambientais, como emissões de gases de efeito estufa, devido à indisponibilidade de dados e limitantes da própria metodologia, que solicita dados secundários sobre esses indicadores. Esse é um ponto que pode ser respondido por esta pesquisa, que irá verificar os níveis de emissões e o gasto de energia devido ao uso de combustíveis do setor na região estudada.

O IMUS mensura o indicador denominado Índice de Passageiro por Quilômetro (IPK), presente também no PDTU. Esse indicador é medido pela razão entre a quantidade de passageiros e os quilômetros percorridos (unidade passageiros/km). Esse indicador revela quantos passageiros são transportados por quilômetros, em relação a um determinado modal.

No caso do DF, o IPK apresentou queda no período de 2001 a 2009, conforme o Gráfico 3, que representa o índice de passageiro por quilômetro (IPK) equivalente. Em março de 2009, o índice do DF marcava 1,1, enquanto a média nacional marcava 1,62 (GDF, 2010).

Gráfico 3: Índice de Passageiros por Quilômetro (IPK) do DF, de 2001 a 2009.

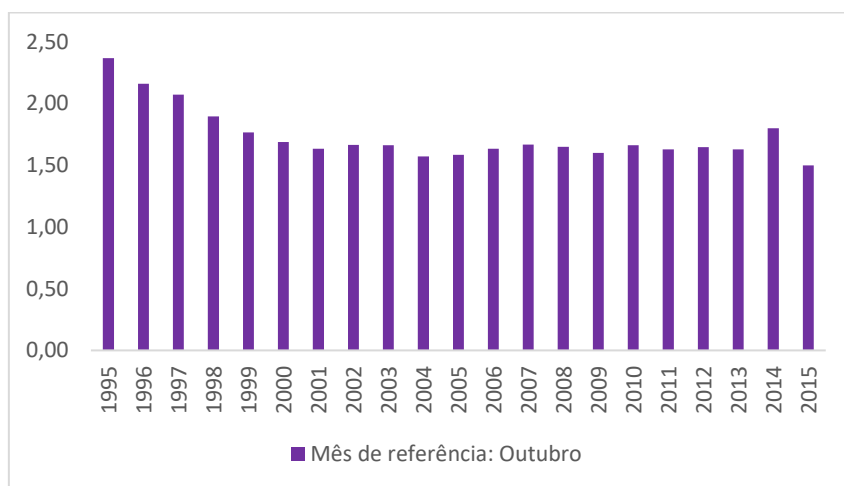


Fonte: PDTU (GDF, 2010; p. 26).

Em termos de passageiros transportados pelo transporte público, e mais especificamente por ônibus urbanos, o Índice de Passageiros por Quilômetro (IPK), segundo o Anuário CNT do Transporte (CNT, 2017), em 9 capitais brasileiras (Belo

Horizonte, Curitiba, Fortaleza, Goiânia, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro, Salvador e São Paulo) apresentou queda ao longo dos últimos 20 anos, de acordo com o Gráfico 4. Isso indica que cada vez menos passageiros fazem uso desse modal, um indicativo de migração do transporte público para o privado.

Gráfico 4: Índice de Passageiros por Quilômetro (IPK) dos ônibus urbanos em capitais brasileiras, de 1995 a 2015.



Fonte: Anuário CNT do Transporte (CNT, 2017), elaborado pela autora.

Diante deste quadro de ineficiência da mobilidade urbana do DF, que pode ser visto também em diversas metrópoles do Brasil. Cada caso possui suas respectivas causas, mas de uma forma geral, as consequências se refletem principalmente na qualidade de vida da população urbana, e exatamente por isso, soluções mais eficientes e sustentáveis devem ser buscadas. Apesar disso, o índice atingiu certa estabilidade na última década, em comparação aos anos anteriores.

4 METODOLOGIA

Este estudo trata-se de uma pesquisa quantitativa, em que foi feito um estudo de caso do sistema de mobilidade urbana do Distrito Federal, nos anos de 2010 e 2020, em acordo com os estudos realizados pelo Plano Diretor de Transporte Urbano.

Considerando os objetivos desta pesquisa, espera-se:

- a) Avaliar ACV como uma ferramenta de diagnóstico de políticas de mobilidade urbana mais eficientes;
- b) Comparar os impactos energéticos do padrão de mobilidade urbana do Distrito Federal;
- c) Comparar os impactos da emissão de gases poluentes e de efeito estufa (GEE) do setor de transportes do Distrito Federal, considerando a fonte de energia utilizada;
- d) Avaliar indicadores de eficiência de consumo energético em relação ao transporte de passageiros do Distrito Federal.

De acordo com a bibliografia referenciada, a análise de eficiência de mobilidade urbana em termos de energia deve considerar o desempenho de cada modal, de forma que seja possível avaliar a pegada ecológica de cada um. O modelo, baseado em dados do PDTU (GDF, 2010) e calculado em termos de avaliação de ciclo de vida, considera a produção de viagens divididas em:

- Modal rodoviário: carro individual, ônibus e micro-ônibus;
- Modal ferroviário: metrô e VLT.

O cálculo do modelo de mobilidade urbana do DF e Entorno reflete os anos de 2010 e 2020 de cada alternativa do PDTU, e deve considerar o volume de transporte de passageiros (em número absoluto e quilos por pessoa), a quilometragem percorrida (em km), resultando na quantidade de toneladas que está sendo transportada por quilômetro. Deve-se considerar também a frota por modal, a eficiência energética (L/km) de cada tipo de veículo, por grupos, e o número de viagens² realizadas por eles.

² Em mobilidade urbana, viagem refere-se a um trajeto, de um ponto a outro. Por exemplo, se um indivíduo sai de casa e vai ao trabalho, e depois do trabalho vai para academia, ele realiza 2 viagens. Da mesma forma, um ônibus que carrega 50 passageiros da rodoviária à UnB, realiza 50 viagens. A contagem de passageiros é diferente do número de viagens.

No modelo do GaBi (*software* utilizado nesta pesquisa), cada veículo é abastecido pelo combustível utilizado (em kg ou MJ), e o cálculo do balanço de ACV fornece o custo ambiental da produção de cada combustível. Dessa forma, este estudo irá avaliar os custos ambientais para produção dos combustíveis utilizados, assim como o resultado do seu uso pelo sistema de mobilidade urbana do DF e Entorno. O limitante dessa pesquisa é que ela não envolve os custos relacionados à construção da estrutura de mobilidade urbana. A abordagem dessa pesquisa trata dos fluxos de energia em termos de produção e consumo, e possui como referência o cenário “Nada a Fazer 2010”, cenário que ocorreu, e dos cenários propostos e analisados pelo PDTU, denominados “Nada a Fazer 2020”, “1A-2020”, “1B-2020”, “2-2020”. Não foram analisados os demais cenários para os anos de 2010, uma vez que estes cenários não ocorreram, e também por esta pesquisa buscar avaliar os impactos futuros da mobilidade urbana do DF.

A avaliação do ciclo de vida do sistema de mobilidade permitirá que seja feito o balanço energético do consumo do *mix* de energia dos modais de transportes utilizados no DF e qual a sua emissão de GEE. Portanto, considerando as etapas de ciclo de vida, esta pesquisa avalia apenas os custos ambientais das etapas de produção e do uso dos principais combustíveis utilizados pelo atual sistema de mobilidade urbana do DF.

O cálculo da avaliação de ciclo de vida traz como resultado a energia total gasta pelo sistema e a energia associada à quantidade utilizada. O plano desenvolvido no GaBi traz a quantidade de combustível consumido e suas respectivas emissões. Os resultados de emissões e consumo de energia serão normalizados em termos de viagens por quilômetro, e passageiros por quilômetro.

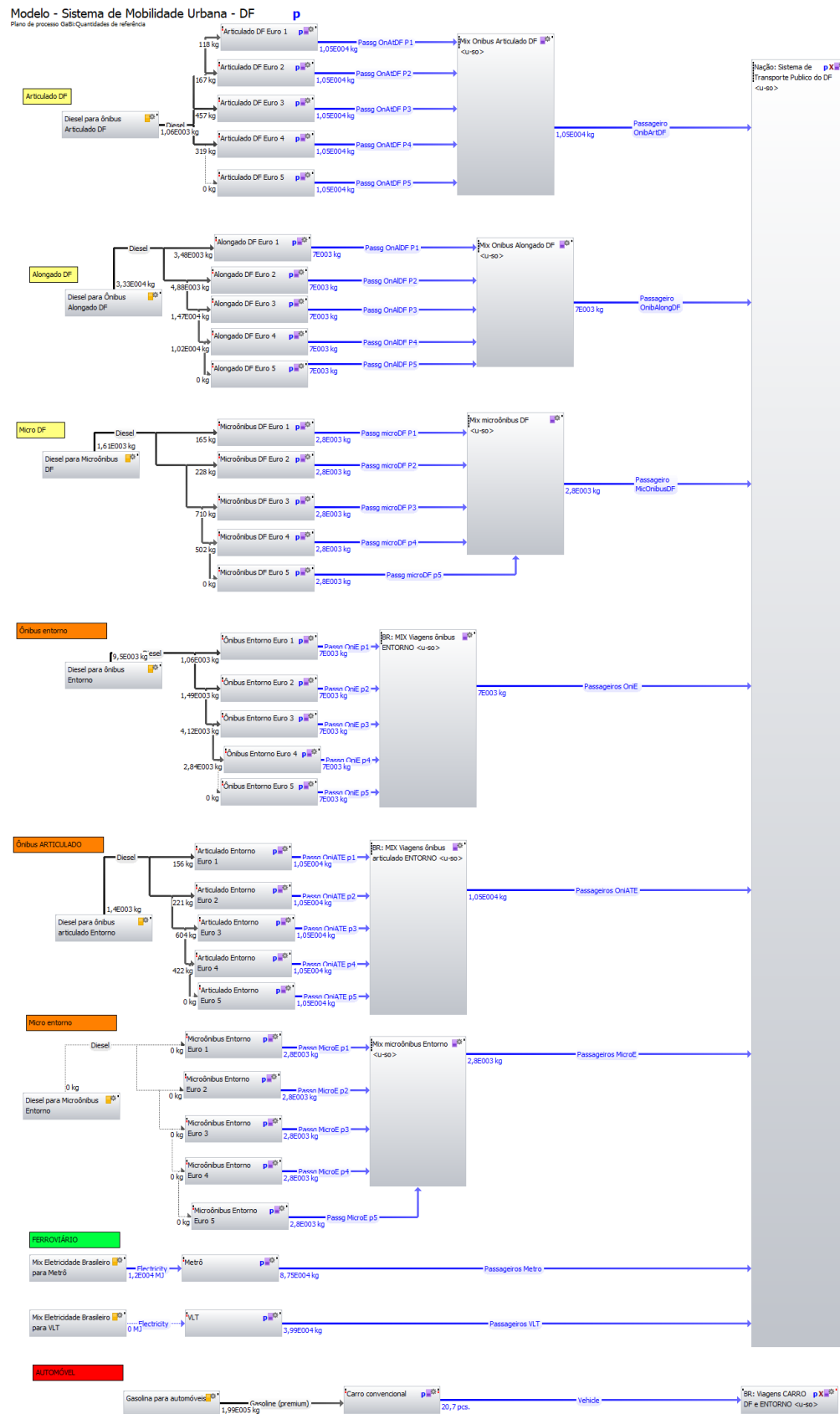
Os parâmetros globais, denominados no GaBi, são as variáveis que influenciam diretamente o desempenho do sistema. São estabelecidos parâmetros globais para o cenário referência, e ao calcular o balanço do ACV são enumerados os demais cenários, que irão ter seus respectivos valores para os parâmetros a serem alterados, conforme PDTU. Alguns parâmetros podem se manter os mesmos para os diferentes cenários. Dessa forma, espera-se avaliar a participação de cada tipo de combustível por tipo de veículo, o número de passageiros transportados e a quantidade de viagens realizadas por cada modal. Além disso, também deve ser considerada a intensidade de energia

utilizada por distância percorrida (L/KM), por cada tipo de veículo e por cada tipo de combustível.

O modelo descrito é ilustrado na Figura 4, em que se tem o seguinte sistema de mobilidade urbana do DF e Entorno de acordo com o PDTU (GDF, 2010), no GaBi, dividido por modais rodoviário, ferroviário, e transporte individual. As viagens estão divididas em “Sistema de transporte público”, que inclui DF e Entorno, e “Viagens por Carro no DF e Entorno”. Cada “caixa” representa um processo, que fornece as entradas para o processo seguinte.

Os processos de produção de combustível estão em acordo com os padrões brasileiros, fornecidos pelo GaBi. Dessa forma, os ônibus são abastecidos a diesel, os modais ferroviários abastecidos pelo *mix* de energia elétrica, e os carros por gasolina. De acordo com o DENATRAN (2017), cerca de 90% da frota de carros do DF utilizam gasolina como combustível, por esse motivo, no modelo foi considerada apenas a produção e o uso de gasolina como combustível dos automóveis.

Figura 4: O modelo desenvolvido sobre o sistema de mobilidade urbana do Distrito Federal e Entorno.



Fonte: elaborado pela autora.

As viagens do sistema de transporte público são realizadas pelos seguintes tipos de veículos: ônibus alongado (DF); ônibus articulado (DF e Entorno); Micro-ônibus (DF e Entorno); ônibus urbano (Entorno); metrô (DF); e VLT (DF). Algumas considerações foram feitas em relação a esses veículos.

Primeiramente, o GaBi fornece processos de viagens de caminhões, e não de ônibus. Por isso, foram selecionados caminhões com características físicas (tamanho e capacidade de carga) semelhantes aos ônibus urbanos brasileiros, assim como características de padrão de uso de combustível em conformidade com o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (BRASIL, 2014), de acordo com a Tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Características dos ônibus urbanos brasileiros.

| | Peso padrão | Capacidade de carga padrão | Padrão de consumo |
|-------------------------------------|--------------|----------------------------|-------------------|
| Ônibus urbano | 16 toneladas | 2,8 toneladas | 2,3 km/L (diesel) |
| Ônibus articulado (tipo BRT) | 26 toneladas | 10 toneladas | 2,3 km/L (diesel) |
| Microônibus | 5 toneladas | 7 toneladas | 3,8 km/L (diesel) |

Fonte: Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários - BRASIL (2014); Associação Nacional de Empresas de Transporte Urbano – ABNT NBR 15570. Elaborado pela autora.

No modelo, a frota foi diferenciada em termos de Euro 1 a 5, característica relativa à idade da frota. Isso ocorre porque conforme os padrões de emissão dos veículos foram se adequando a novas normas de emissões, os veículos mais recentes possuem diferentes níveis de eficiência. Dessa forma, conforme a Tabela 2, foi necessário considerar os padrões do Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), que estabelece as seguintes fases (P) para veículos pesados:

Tabela 2: Fases do PROCONVE e conformidade ao padrão Euro.

| Limites de emissão de diesel no Brasil | | |
|--|------------|------|
| PROCONVE | Referência | Data |
| Fase P1 | Índice K | 1989 |
| Fase P2 | Euro 0 | 1994 |
| Fase P3 | Euro 1 | 1996 |
| Fase P4 | Euro 2 | 2000 |
| Fase P5 | Euro 3 | 2005 |
| Fase P6 | Euro 4 | 2009 |
| Fase P7 | Euro 5 | 2016 |

Fonte: PROCONVE (2012). Adaptado pela autora.

A Tabela 3 traz os dados da Secretaria de Mobilidade Urbana do Distrito Federal (SEMOB, 2016), fornecidos diretamente para esta pesquisa, da atual frota de ônibus e micro-ônibus urbanos do DF, que está dividida da seguinte forma:

Tabela 3: Frota de ônibus do Distrito Federal, por ano.

| Ano de Fabricação | Quantidade de ônibus (2016) | Parâmetros para os cenários | | Euro |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|--------|
| | | 2010 | 2020 | |
| Até 1999 | 323 | 11% | 11% | Euro 1 |
| 2000-2001 | 427 | 15% | 15% | Euro 2 |
| 2002-2003 | 21 | 1% | 1% | |
| 2004-2008 | 1.201 | 42% | 42% | Euro 3 |
| 2009 | 452 | 16% | 16% | Euro 4 |
| 2010 | 428 | 15% | 15% | |
| 2011 | 16 | 0% | 1% | Euro 5 |
| 2012 | 10 | 0% | 0% | |
| Total Frota | 2.878 | 2.852 | 100% | |

Fonte: SEMOB (2016, DF), informações fornecidas pelo trabalho de Airton Hélio Milani.

Elaborado pela autora.

4.1 Detalhamento do cálculo do modelo no GaBi (ACV)

4.1.1 Transporte público – rodoviário e ferroviário

Os ônibus do sistema de mobilidade urbana do DF se dividem em articulados, alongados e micro-ônibus. No entorno, o transporte pode ser realizado por ônibus articulado, ônibus comum e micro-ônibus (presente apenas nos cenários tipo “2”).

Para cada processo de ônibus no GaBi, foram aplicados os seguintes parâmetros:

- Biodiesel: 5% de representatividade no diesel;
- Quantidade de enxofre na mistura Diesel-Biodiesel: 500ppm;
- Distância percorrida: percentual da frota equivalente ao tipo “euro” multiplicado pela distância total percorrida por aquele grupo de ônibus (por exemplo: os ônibus articulados do DF no cenário “1 A – 2020” percorrem 35.137km, portanto os ônibus Euro 1 para este cenário irão percorrer 11% x 35.137).

No *mix* de Viagens por cada tipo de ônibus, estão relacionadas as cargas de cada ônibus, que equivale ao peso da quantidade total de pessoas transportadas. O IBGE (2010) estabelece que o peso médio do brasileiro é de 70 kg. De acordo com os valores do PDTU, a demanda para o transporte de ônibus é maior do que a oferta. Portanto, considera-se que os ônibus no horário de pico da manhã (que é a referência para o cálculo do PDTU) sairão todos com a carga máxima de pessoas. Por exemplo, se no ônibus alongado a capacidade é de 100 pessoas, portanto a sua carga será sempre 70kg x 100 pessoas, independente do cenário. Essa lógica é aplicada a todas as viagens realizadas por todos os tipos de ônibus.

O transporte ferroviário é realizado apenas no DF, feito por metrô e VLT (este último presente apenas nos cenários “1-A” e “2”). Os processos de transporte realizados por esses veículos são alimentados pelo *mix* de energia elétrica brasileiro, em conformidade com os padrões fornecidos pelo GaBi.

Cada veículo percorrerá os quilômetros relativos a cada cenário, e a carga também será a capacidade máxima de pessoas transportadas, sendo a capacidade do metrô de 1250 pessoas e do VLT de 570 (multiplicados por 70 kg de cada passageiro). Os veículos selecionados no GaBi também estão de acordo com os padrões de peso e carga dos metrôs brasileiros, assim como seus níveis de eficiência energética.

O GaBi processa as fórmulas e os parâmetros para fornecer a quantidade de combustível necessária para alimentar sistema, em cada cenário, e assim as suas saídas, que são as emissões do transporte urbano e os danos ambientais causados por esse sistema.

4.1.2 Transporte individual - Automóveis

Para os automóveis, foi selecionado um único veículo convencional, que possui o seu nível de eficiência em conformidade com os padrões do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores (2013), que estabelece que a média de consumo de um automóvel urbano movido a gasolina é de 11,3 km/L. Para cálculo no modelo, foi considerada a quilometragem total percorrida no pico da manhã pelo transporte individual, estipulado pelo PDTU, para cada um dos cenários avaliados.

4.2 Descrição dos cenários e indicadores utilizados

Os cenários foram calculados com base nos dados fornecidos pelo PDTU (GDF, 2010) para os anos de 2010 e 2020, conforme as tabelas abaixo, que podem ser descritas da seguinte forma:

- Capacidade: quantidade total de pessoas que podem ser transportadas por cada tipo de veículo;
- Frota: quantidade de veículos;
- Demanda: quantidade de passageiros transportados, no total;
- Distância: quilometragem total percorrida por modo;
- Velocidade média: velocidade média por hora, por modo.

O PDTU (GDF, 2010) elabora os cenários em termos de dados operacionais por tipo de veículo, para a hora de pico da manhã. Dessa forma, são dimensionadas as variáveis para o horário de maior uso das vias, para não subestimar a operação do sistema.

A Tabela 4 informa os valores do cenário “Nada a Fazer 2010”, e para o automóvel, nesse cenário e em todos os outros, considera a taxa de motorização de 1,5. A Tabela 5 informa os valores do cenário “Nada a Fazer 2020”, em que são calculados os mesmos modais do cenário “Nada a Fazer 2010”. Como pode ser visto nas tabelas, há aumento da frota, da demanda, e da distância percorrida quando se comparam os cenários de 2020 em relação ao cenário de 2010. Isso ocorre devido ao crescimento populacional e ao crescimento da renda, que são fatores que incrementam a produção viagens da mobilidade urbana, de acordo com o PDTU.

Tabela 4: Dados do cenário "Nada a Fazer - 2010".

| NADA A FAZER 2010 | | | | | | | |
|-------------------|-------------|-----------------|------------------------|-------|-----------------------|------------------|-------------------------|
| REGIÃO | MODAL | TIPO DO VEÍCULO | CAPACIDADE | FROTA | DEMANDA (PASSAGEIROS) | DISTÂNCIA (KM) | VELOCIDADE MÉDIA (KM/H) |
| DF | RODOVIÁRIO | ALONGADO | 100 | 3.930 | 212.677 | 92.487 | 28,4 |
| DF | RODOVIÁRIO | ARTICULADO | 150 | 114 | 6.873 | 2.922 | 29,0 |
| DF | RODOVIÁRIO | MICROÔNIBUS | 40 | 341 | 13.853 | 8.223 | 26,3 |
| ENTORNO | RODOVIÁRIO | ÔNIBUS | 100 | 941 | 39.036 | 28.176 | 35,9 |
| ENTORNO | RODOVIÁRIO | ARTICULADO | 150 | 128 | 8.086 | 3.866 | 33,2 |
| DF | FERROVIÁRIO | METRÔ | 1.250 | 11 | 7.392 | 770 | 40,0 |
| DF E ENTORNO | RODOVIÁRIO | AUTOMÓVEL | Taxa de ocupação: 1,51 | -- | 213.538 | 3.101.372 | 38,2 |
| | | | | | | | 29,7 |

Fonte: PDTU (GDF, 2010, tabelas 23 e 39), adaptado pela autora.

Tabela 5: Dados do cenário "Nada a Fazer - 2020".

| NADA A FAZER 2020 | | | | | | | |
|-------------------|-------------|-----------------|------------------------|-------|-----------------------|------------------|-------------------------|
| REGIÃO | MODAL | TIPO DO VEÍCULO | CAPACIDADE | FROTA | DEMANDA (PASSAGEIROS) | DISTÂNCIA (KM) | VELOCIDADE MÉDIA (KM/H) |
| DF | RODOVIÁRIO | ALONGADO | 100 | 8.264 | 230.814 | 124.173 | 16,5 |
| DF | RODOVIÁRIO | ARTICULADO | 150 | 903 | 34.949 | 12.111 | 16,0 |
| DF | RODOVIÁRIO | MICROÔNIBUS | 40 | 179 | 4.605 | 3.184 | 19,2 |
| ENTORNO | RODOVIÁRIO | ÔNIBUS | 100 | 1.968 | 49.611 | 35.196 | 19,5 |
| ENTORNO | RODOVIÁRIO | ARTICULADO | 150 | 512 | 19.482 | 8.816 | 18,1 |
| DF | FERROVIÁRIO | METRÔ | 1.250 | 17 | 20.688 | 1.191 | 40,0 |
| DF E ENTORNO | RODOVIÁRIO | AUTOMÓVEL | Taxa de ocupação: 1,51 | -- | 330.970 | 5.404.751 | 19,2 |
| | | | | | | | 17,1 |

Fonte: PDTU (GDF, 2010, tabelas 31 e 39), adaptado pela autora.

Os cenários "1-A", "1-B" e "2-A" para os horizontes de 2020 são descritos nas tabelas abaixo. Na Tabela 6, referente ao cenário "1-A", é acrescentado o transporte realizado por VLT. Na Tabela 7, referente ao cenário "1-B", são mantidos os mesmos modais do cenário "Nada a Fazer". Na Tabela 8, referente ao cenário "2-A", além do VLT, acrescenta-se o transporte realizado por Micro-ônibus no Entorno. Cabe ressaltar que para o transporte realizado por automóvel, o PDTU considera a demanda de passageiros a mesma para os cenários 2020, apesar da quilometragem percorrida variar.

Tabela 6: Dados do cenário "1A - 2020".

| 1A 2020 | | | | | | | |
|--------------|-------------|-----------------|------------------------|-------|-----------------------|----------------|-------------------------|
| REGIÃO | MODAL | TIPO DO VEÍCULO | CAPACIDADE | FROTA | DEMANDA (PASSAGEIROS) | DISTÂNCIA (KM) | VELOCIDADE MÉDIA (KM/H) |
| DF | RODOVIÁRIO | ALONGADO | 100 | 1.662 | 242.846 | 47.532 | 23,7 |
| DF | RODOVIÁRIO | ARTICULADO | 150 | 1.026 | 148.274 | 35.137 | 27,9 |
| DF | RODOVIÁRIO | MICROÔNIBUS | 40 | 47 | 3.881 | 840 | 21,3 |
| ENTORNO | RODOVIÁRIO | ÔNIBUS | 100 | 1.332 | 56.526 | 36.853 | 31,4 |
| ENTORNO | RODOVIÁRIO | ARTICULADO | 150 | 441 | 25.659 | 12.182 | 29,9 |
| DF | FERROVIÁRIO | METRÔ | 1.250 | 17 | 44.022 | 1.218 | 40,0 |
| DF | FERROVIÁRIO | VLT | 570 | 12 | 11.172 | 504 | 24,0 |
| DF E ENTORNO | RODOVIÁRIO | AUTOMÓVEL | Taxa de ocupação: 1,51 | -- | 330970 | 5146409 | 28,6 |
| | | | | | | | 27,2 |

Fonte: PDTU (GDF, 2010, tabelas 33 e 40), adaptado pela autora.

Tabela 7: Dados do cenário "1B - 2020".

| 1B 2020 | | | | | | | |
|--------------|-------------|-----------------|------------------------|-------|-----------------------|------------------|-------------------------|
| REGIÃO | MODAL | TIPO DO VEÍCULO | CAPACIDADE | FROTA | DEMANDA (PASSAGEIROS) | DISTÂNCIA (KM) | VELOCIDADE MÉDIA (KM/H) |
| DF | RODOVIÁRIO | ALONGADO | 100 | 1.974 | 260.497 | 56.913 | 23,6 |
| DF | RODOVIÁRIO | ARTICULADO | 150 | 999 | 128.754 | 33.748 | 27,7 |
| DF | RODOVIÁRIO | MICROÔNIBUS | 40 | 54 | 4.207 | 990 | 22,5 |
| ENTORNO | RODOVIÁRIO | ÔNIBUS | 100 | 1.386 | 55.075 | 38.378 | 31,4 |
| ENTORNO | RODOVIÁRIO | ARTICULADO | 150 | 463 | 27.707 | 12.564 | 29,3 |
| DF | FERROVIÁRIO | METRÔ | 1.250 | 17 | 40.080 | 1.218 | 40,0 |
| DF E ENTORNO | RODOVIÁRIO | AUTOMÓVEL | Taxa de ocupação: 1,51 | -- | 330.970 | 5.148.855 | 28,5 |
| | | | | | | | 26,8 |

Fonte: PDTU (GDF, 2010, tabelas 35 e 41), adaptado pela autora.

Tabela 8: Dados do cenário "2 - 2020".

| 2 2020 | | | | | | | |
|--------------|-------------|-----------------|------------------------|-------|-----------------------|------------------|-------------------------|
| REGIÃO | MODAL | TIPO DO VEÍCULO | CAPACIDADE | FROTA | DEMANDA (PASSAGEIROS) | DISTÂNCIA (KM) | VELOCIDADE MÉDIA (KM/H) |
| DF | RODOVIÁRIO | ALONGADO | 100 | 1.821 | 263.902 | 51.492 | 23,3 |
| DF | RODOVIÁRIO | ARTICULADO | 150 | 1.195 | 150.759 | 40.666 | 27,7 |
| DF | RODOVIÁRIO | MICROÔNIBUS | 40 | 44 | 3.826 | 985 | 26,6 |
| ENTORNO | RODOVIÁRIO | ÔNIBUS | 100 | 710 | 36.292 | 19.699 | 31,2 |
| ENTORNO | RODOVIÁRIO | ARTICULADO | 150 | 734 | 49.950 | 21.322 | 32,0 |
| ENTORNO | RODOVIÁRIO | MICROÔNIBUS | 150 | 54 | 3.042 | 1.119 | 24,2 |
| DF | FERROVIÁRIO | METRÔ | 1.250 | 26 | 57.609 | 1.647 | 35,0 |
| DF | FERROVIÁRIO | VLT | 570 | 32 | 17.755 | 870 | 22,6 |
| DF E ENTORNO | RODOVIÁRIO | AUTOMÓVEL | Taxa de ocupação: 1,51 | -- | 330.970 | 5.140.711 | 28,6 |
| | | | | | | | 26,8 |

Fonte: PDTU (GDF, 2010, tabelas 37 e 42), adaptado pela autora.

O modelo descrito, elaborado no GaBi, permite que sejam calculados os valores de “*Global Warming Potential*” (GWP) de cada cenário, assim como o “*Primary Energy Demand*”. O GWP, traduzido como Potenciais de Aquecimento Global, é uma métrica utilizada para comparar os efeitos climáticos das emissões dos diversos gases de efeito estufa. Essa métrica existe há cerca de 20 anos, e é usada em diretrizes internacionais, como o Protocolo de Kyoto (IPCC, 2009; SHINE, 2009). Dessa forma, esta pesquisa poderá avaliar o quanto o padrão de mobilidade urbana do DF e Entorno está contribuindo para as emissões desses gases. A Avaliação de Ciclo de Vida fornece os dados de impactos ambientais em termos das seguintes categorias: depleção abiótica; potencial de acidificação; potencial de eutrofização; potenciômetro de ecotoxicidade aquática de água doce; **potencial de aquecimento global (GWP 100 anos, em kg CO₂-Equiv.)**; potencial de aquecimento global (GWP 100 anos), excluindo carbono biogênico; potencial de toxicidade humana, potencial de eco toxicidade aquática marinha; potencial de depleção da camada de ozônio; potencial de criação de ozônio; potencial de eco toxicidade terrestre. Para as análises dos resultados, por cenário e por modal, foi considerado apenas o potencial de aquecimento global em termos de CO₂ equivalente, por ser o valor mais relevante e mais avaliado no setor de transportes. Os valores calculados de todos esses indicadores, para cada um dos cenários, estão disponíveis no Anexo A.

Além da categoria de impacto ambiental GWP, foi também analisada a demanda de energia primária (conhecido na literatura inglesa como *Primary Energy Demand*, PED) (em MJ) necessária para fazer funcionar os diversos cenários. O PED pode ser considerada a melhor métrica para avaliação de eficiência energética dos sistemas, pois as perdas decorrentes de transformação e transporte são levadas em consideração, além de conter a “energia de alimentação”, que significa o equivalente de energia primária dos materiais utilizados (KLOPFER, 1997).

Dessa forma, a análise dos cenários irá considerar os impactos ambientais em termos de emissões de gases de efeito estufa, e em termos de consumo de energia. São critérios importantes de serem avaliados sobre um determinado sistema de transporte, pois são variáveis que impactam diretamente o meio ambiente e a economia do contexto em que aquele sistema está inserido.

5 ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS

Como mencionado, as análises dos cenários foram feitas em termos de - GWP e de PED. A análise partiu de indicadores abrangentes, avaliando o total de cada cenário, seguindo a indicadores cada vez mais específicos, avaliando o GWP e PED por tipo de combustível, por modal/veículo, e por transporte coletivo e individual. Dessa forma, foi possível ver a participação de cada combustível no total das emissões e o gasto de energia, além dos valores de cada cenário, e assim verificar variáveis de maior impacto. Vale ressaltar que as análises são baseadas nas projeções elaboradas pelo Plano Diretor de Transporte Público do Distrito Federal (GDF, 2010), que incluem alternativas que propõem intervenções no transporte público do DF e Entorno.

Considerando o GWP e PED totais, todos os cenários apresentam aumento em relação ao cenário “Nada a Fazer – 2010”, conforme o Gráfico 5. A alternativa “Nada a Fazer – 2020” é que a apresenta maior aumento, pois considera que nenhuma mudança seria implementada no intervalo de 2010 a 2020. No entanto, mesmo nos cenários em que há intervenção, também há aumento do nível de emissões e da demanda de energia primária, sendo necessária a verificação do nível de eficiência em termos de passageiros e distância percorrida.

Em termos absolutos, enquanto no cenário Nada a Fazer 2010 são emitidos 0,82 milhões de kg de CO₂ equivalente e transportados 501.465 passageiros, no cenário Nada a Fazer 2020, as emissões evoluem para 1,37 kg de CO₂-equiv, ao transportar 689.119 passageiros. Ou seja, enquanto as emissões crescem cerca de 67%, o número de passageiros cresce 37%. Comparando os cenários futuros com o cenário Nada a Fazer 2020, GWP e PED decrescem cerca de 8%, enquanto o número de passageiros aumenta em torno de 25%. Isso indica que as alternativas propostas pelo PDTU podem apresentar melhor nível de eficiência, pois em 2020, ao sofrer o mesmo incremento populacional, as emissões e o consumo de energia são inferiores quando há intervenções. Em relação a PED, o cenário Nada a Fazer 2010 consome 13,29 milhões de MJ, seguido do cenário 1A com 20,53 milhões de MJ, depois o cenário 2 com 20,56 milhões de MJ, o cenário 1B com 20,71 milhões de MJ e apresentando o maior consumo o cenário Nada a Fazer 2020, consumindo 22,33 milhões de MJ.

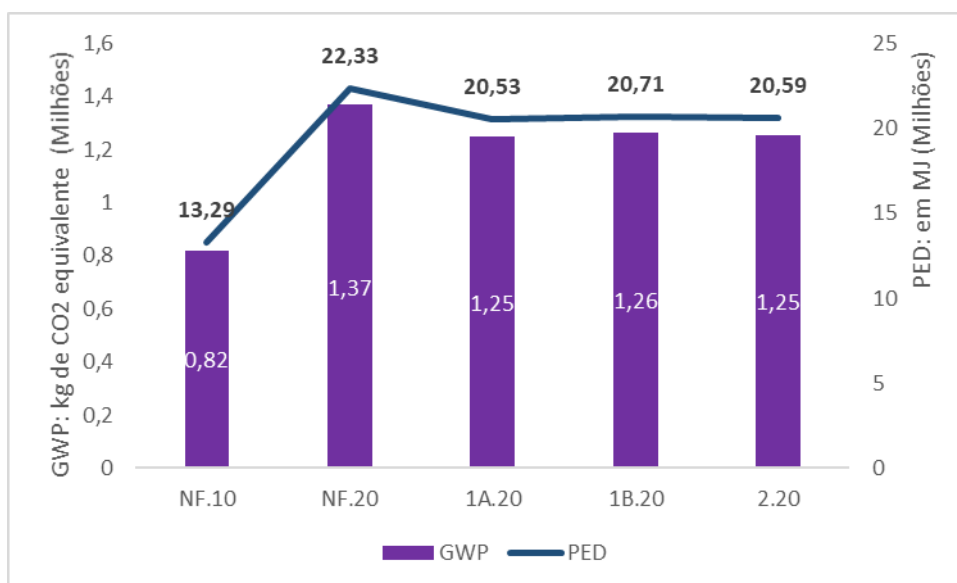


Gráfico 5: Total de GWP e PED, por cenário.

Fonte: elaborado pela autora.

A gasolina possui uma alta representatividade nas duas métricas avaliadas, sendo responsável por cerca de 80% do total de cada cenário, conforme a Tabela 9. Nas alternativas futuras, a representatividade da gasolina aumenta, enquanto a do diesel diminui. Este é um indicativo da baixa eficiência ambiental do uso da gasolina para o transporte individual, pois enquanto realiza 50% das viagens motorizadas, é responsável por 80% das emissões e do consumo de energia. Enquanto nos cenários futuros a representatividade da gasolina no total de GWP e PED aumenta e chega a 88% no cenário 1A, a representatividade das demais fontes de energia (diesel e eletricidade) decai, e passa de 20% para cerca de 13%.

Tabela 9: Representatividade de cada combustível no total de GWP e PED, por cenário.

| % DO TOTAL | | NF.10 | NF.20 | 1A.20 | 1B.20 | 2.20 | |
|------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PÚBLICO | DIESEL | GWP | 20,0% | 16,6% | 13,1% | 14,0% | 13,4% |
| | | PED | 17,6% | 14,6% | 11,5% | 12,2% | 11,7% |
| | ELETRICIDADE | GWP | 0,1% | 0,1% | 0,1% | 0,1% | 0,2% |
| | | PED | 0,2% | 0,2% | 0,2% | 0,2% | 0,3% |
| | TOTAL | GWP | 20,1% | 16,7% | 13,3% | 14,1% | 13,6% |
| | | PED | 17,8% | 14,7% | 11,7% | 12,4% | 12,0% |
| PARTICULAR | GASOLINA | GWP | 79,9% | 83,3% | 86,7% | 85,9% | 86,4% |
| | | PED | 82,2% | 85,3% | 88,3% | 87,6% | 88,0% |

Fonte: elaborado pela autora.

Ao verificar o GWP (Gráfico 6) e a PED (Gráfico 7) por combustível, que representam a divisão entre transporte público (diesel e eletricidade) e individual (gasolina), nota-se que há aumento do total do nível de emissão e da demanda de energia primária.

No cenário Nada a Fazer 2010 a gasolina emite 653,72 milhares de kg de CO₂-equiv. e consome 10,93 milhões de MJ, enquanto o diesel emite 163,33 milhares de kg de CO₂-equiv. e consome 2,34 milhões de MJ. Já no cenário Nada a Fazer 2020 (sendo o de maior valor) a gasolina emite 1139,20 milhares de kg de CO₂-equiv. e consome 19,04 milhões de MJ, o diesel emite 227,42 milhares de kg de CO₂-equiv. e consome 3,26 milhões de MJ. Dessa forma constata-se o quanto o alto consumo de gasolina traz impactos ambientais e energéticos muito mais significativos, quanto compara-se às demais fontes de energia.

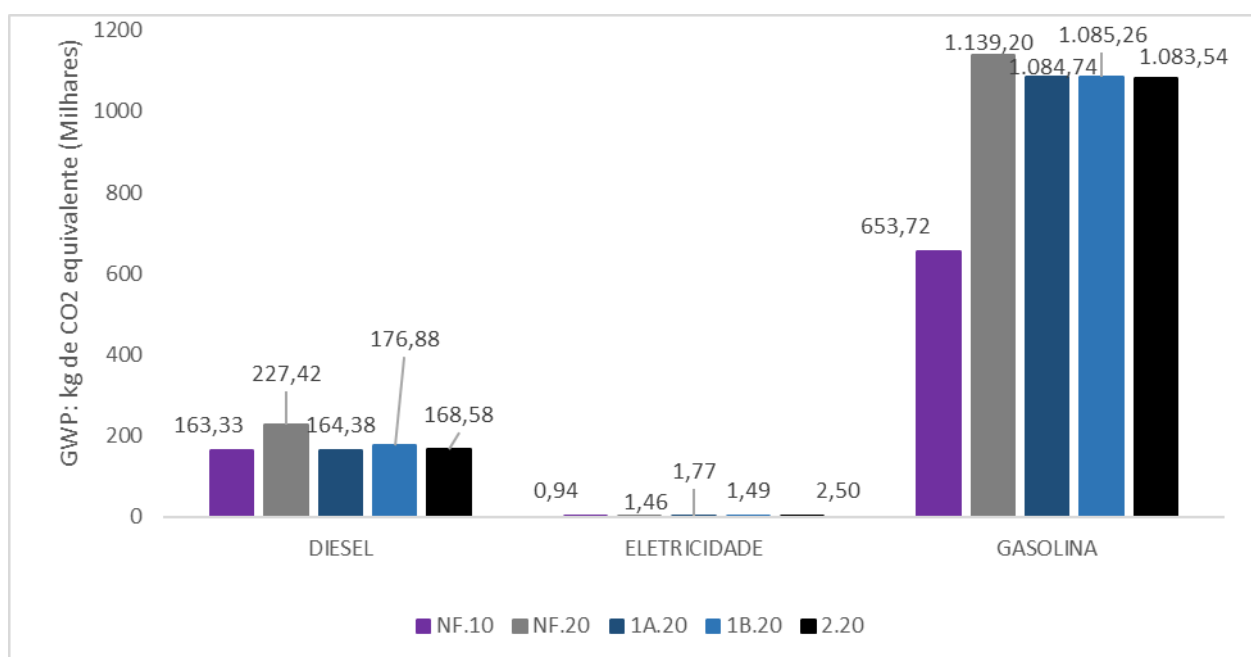


Gráfico 6: GWP por tipo de combustível, por cenário.

Fonte: elaborado pela autora.

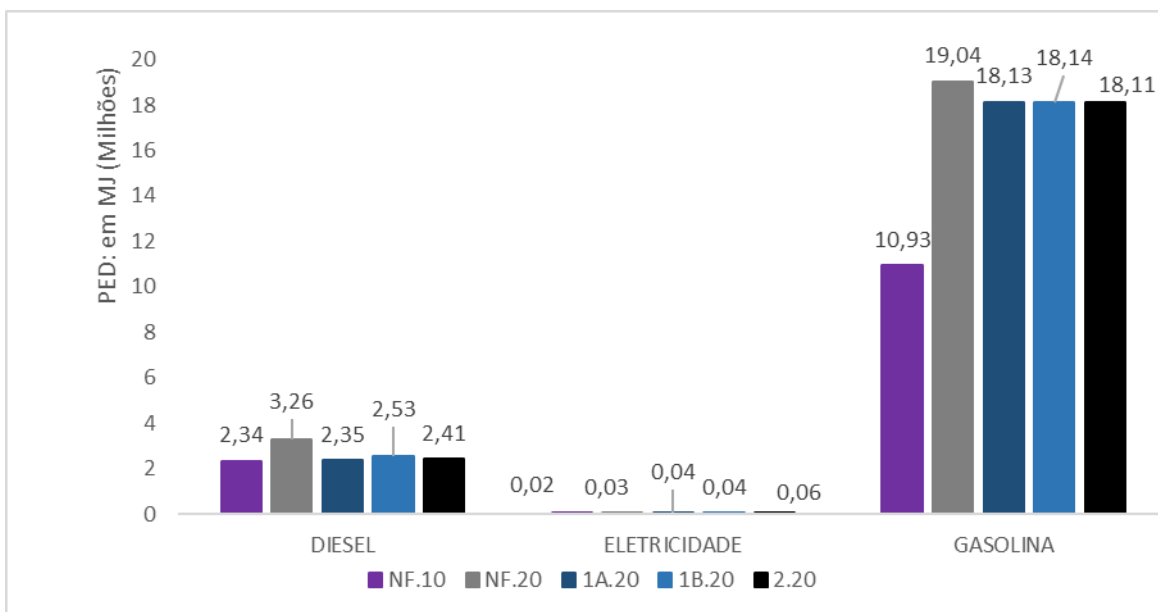


Gráfico 7: PED por tipo de combustível, por cenário.

Fonte: elaborado pela autora.

A eletricidade possui baixa representatividade em todos os cenários, sendo responsável por menos de 1% de GWP e de PED. Considerada uma fonte de energia mais limpa, caso houvesse mais investimentos no modal ferroviário, as emissões e o consumo de energia poderiam reduzir. O transporte ferroviário é responsável pelo transporte de apenas 1% dos passageiros no cenário “Nada a Fazer – 2010”, no entanto esse valor aumenta ao longo dos cenários, sendo que no cenário “2-2020”, o modal ferroviário transporta cerca de 8% dos passageiros. É a alternativa que mais realiza intervenções no metrô e VLT. Dessa forma, mesmo aumentando a quantidade de passageiros transportados, o nível de GWP e PED não impacta tanto o sistema.

Em relação ao transporte coletivo, verifica-se o baixo impacto ambiental do uso da eletricidade, conforme o Gráfico 7 e o Gráfico 8. De forma absoluta, tanto no indicador de GWP quanto de PED, a eletricidade emite e consome cerca de 100 vezes menos nos cenários em que não há incrementos significativos nesse modal, e nos cenários 1A e 2 (que são os de maior incremento), o GWP e PED são cerca de 60 vezes menores.

Enquanto no cenário Nada a Fazer 2010, o diesel emite 163,33 milhares de kg de CO₂-equiv. e consome 2,34 milhões de MJ, a eletricidade marca 0,94 milhares de kg de CO₂-equiv. e 0,02 milhões de MJ. No cenário 2 2020, o diesel emite 168,58 milhares de

kg de CO₂-equiv. e consome 2,41 milhões de MJ, a eletricidade emite 2,5 milhares de kg de CO₂-equiv. e consome 0,06 milhões de MJ. Verifica-se então que o diesel não possui um aumento significativo, apesar de representar quase a totalidade de GWP e PED do transporte coletivo.

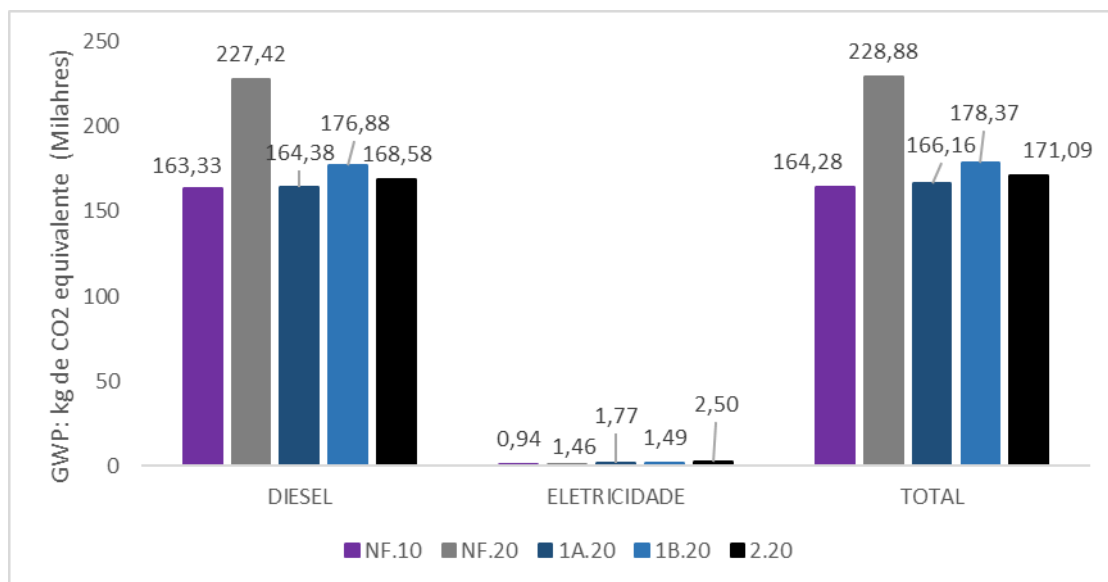


Gráfico 8: GWP total e por tipo de combustível de transporte coletivo, por cenário.

Fonte: elaborado pela autora.

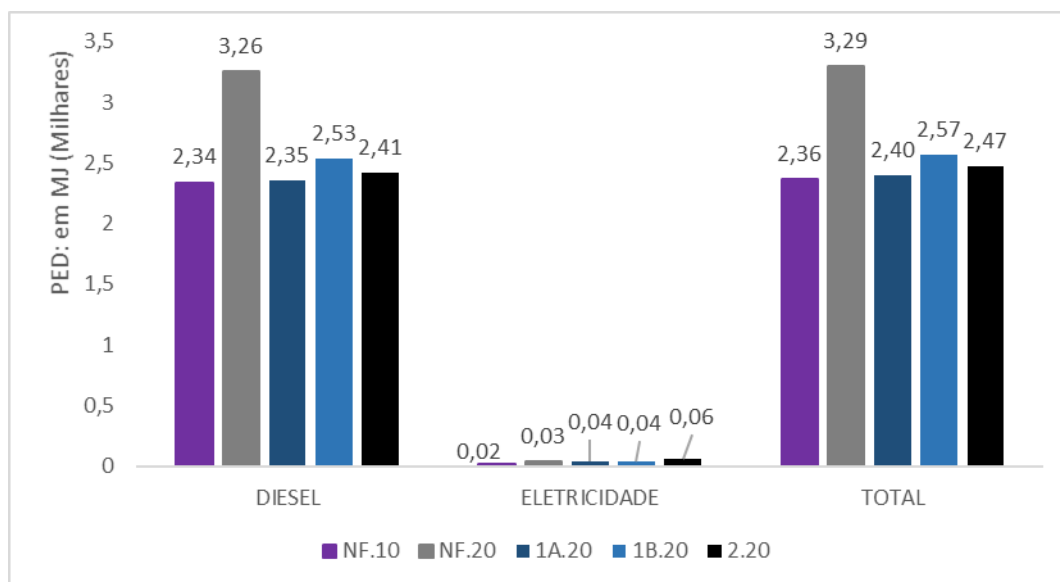


Gráfico 9: PED total e por tipo de combustível de transporte coletivo, por cenário.

Fonte: elaborado pela autora.

Percentualmente, o transporte por diesel é responsável por cerca de 98% de GWP e PED em todos os cenários (em relação ao transporte coletivo). Apesar disso,

verifica-se na Tabela 10 que apesar da representatividade do modal ferroviário variar em torno de 0,1%, a representação na quantidade de passageiros varia 3% ou mais.

Tabela 10: Representatividade do modal ferroviário, em relação ao transporte coletivo de cada cenário.

| REPRESENTATIVIDADE DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|--------|-------|--------|
| | Nada a Fazer 2010 | Nada a Fazer 2020 | 1A | 1B | 2 |
| TRANSPORTE DE PASSAGEIROS | 2,57% | 5,78% | 10,37% | 7,76% | 12,92% |
| GWP | 0,12% | 0,11% | 0,14% | 0,12% | 0,20% |
| PED | 0,17% | 0,16% | 0,21% | 0,17% | 0,29% |

Fonte: elaborado pela autora.

Essa análise significa a eficiência ambiental e energética do modal ferroviário, que consegue incrementar a quantidade de passageiros transportadas sem um incremento equivalente em GWP e PED.

Considerando que o PDTU visa avaliar a melhor alternativa em termos de transporte público, do ponto de vista ambiental e energético, os melhores cenários seriam aqueles que possuem menores valores de GWP e PED para esse tipo de transporte. Portanto, considerando as intervenções previstas no PDTU, os cenários que apresentam menor aumento do GWP e PED do transporte público são os cenários “1-A 2020” e “2 2020”.

Para verificar a representatividade de cada tipo de veículo dos modais rodoviário e ferroviário, serão avaliados o GWP e PED de cada veículo dos cenários “Nada a Fazer 2010”, “Nada a Fazer 2020”, “1-A 2020” e “2 2020”, conforme o Gráfico 10 e o Gráfico 11.

Os veículos que mais emitem e demandam energia são o ônibus alongado do DF, o ônibus articulado do DF, e o ônibus do Entorno. Esses veículos são os que possuem maior representatividade no transporte de passageiros do transporte coletivo, e, portanto, esperar-se-ia que teriam maior participação em GWP e PED. Verificam-se algumas variações nos cenários futuros, em relação ao cenário de 2010. Há maior investimento e ampliação dos ônibus articulados (considerado o BRT) nos cenários de intervenções. Isso ocorre porque o ônibus alongado perde espaço para o ônibus articulado, uma vez que este possui faixas exclusivas e transporta mais passageiros (50%

a mais, por veículo). Ao mesmo tempo, o micro-ônibus perde participação no transporte de passageiros nas alternativas futuras, e, portanto, também reduz seu nível de GWP e PED.

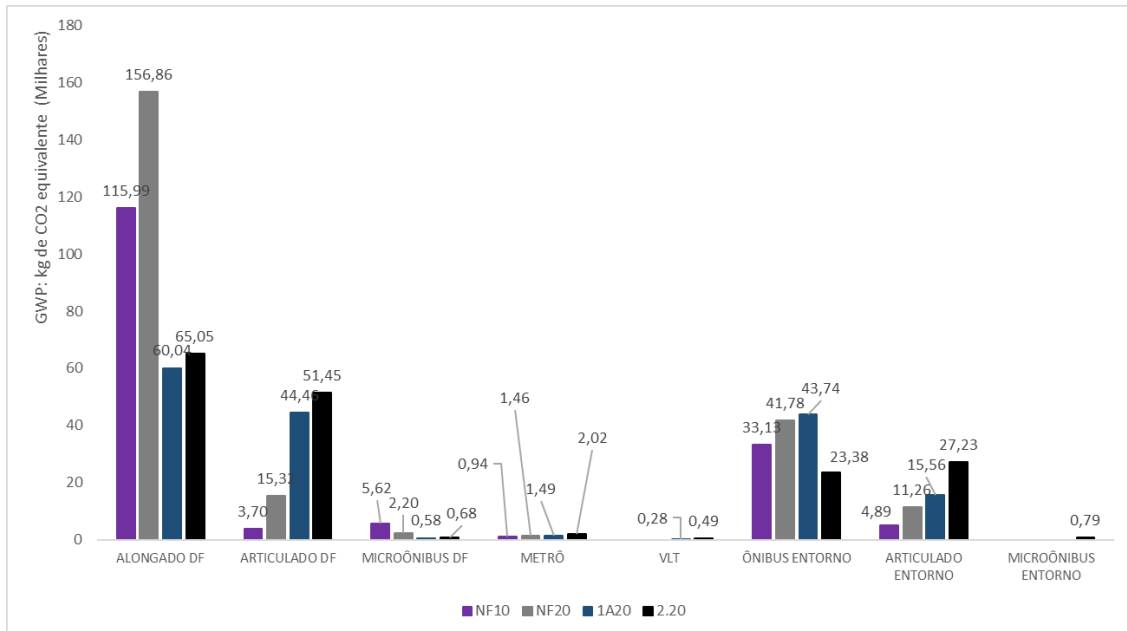


Gráfico 10: GWP por tipo de modal do transporte coletivo, por cenário.

Fonte: elaborado pela autora.

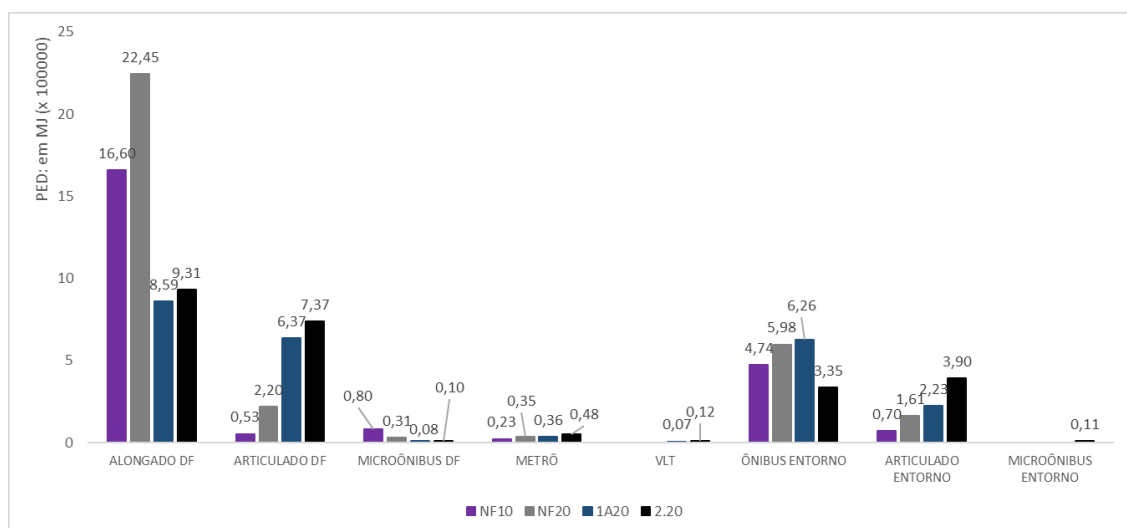


Gráfico 11: PED por tipo de modal do transporte coletivo, por cenário.

Fonte: elaborado pela autora.

Os valores absolutos refletem o quanto cada veículo e cada modal são responsáveis pelo total de GWP e PED. No entanto, esses valores são relativos pois dependem da quantidade de viagens realizadas, de passageiros transportados e da

distância percorrida. Para isso, os resultados serão normalizados de acordo com o Índice de Passageiro por Quilômetro (IPK), abordado pelo PDTU e demais metodologias de análise de mobilidade urbana, como o IMUS (COSTA, 2008), e também em termos de a cada hora de viagem por quilômetro (representado pela velocidade média de cada modal), quanto é emitido e quanto é demandado de energia. Ou seja, serão avaliados os seguintes indicadores:

- GWP / Passageiro;
- PED / Passageiro;
- GWP / IPK;
- PED / IPK;
- GWP / Passageiro X Km/H;
- PED / Passageiro X Km/H.

5.1 GWP e PED por passageiro

Considerando o indicador por passageiro, verifica-se o quanto o automóvel é mais ineficiente que os veículos do transporte coletivo, de acordo com o Gráfico 12 e o Gráfico 13. Isso ocorre porque a taxa de motorização do DF e Entorno indica que os automóveis circulam com 1,51 pessoa, uma evidência de que esses veículos, na verdade, em sua grande maioria circulam com apenas o motorista. Dessa forma, o GWP e o PED, por passageiro, vai ser sempre muito maior para o transporte individual, que além de poder transportar poucas pessoas, ainda não utiliza toda a sua capacidade de transporte. O automóvel apresenta aumento da ineficiência em todos os cenários futuros, sendo a alternativa “Nada a Fazer 2020” a mais ineficiente, pois é a alternativa que apresenta maiores valores de GWP e PED por passageiro de automóvel. Ou seja, os passageiros de automóvel do cenário Nada a Fazer 2020 são os que mais consomem energia e emitem GEE.

Considerando o índice por passageiro, verifica-se que o transporte rodoviário (considerando apenas ônibus e micro-ônibus) emite e consome energia 4 vezes a mais do que o transporte ferroviário no cenário Nada a Fazer 2010, e esse valor aumenta nos cenários futuros, chegando a ser quase 10 vezes maior. Em termos absolutos o diesel emite e consome mais, e em termos relativos (passageiros) também. Essa avaliação reitera a necessidade de investimento no modal ferroviário. Além disso, verifica-se que

o incremento no modal ferroviário não acompanha o crescimento do modal rodoviário, que faz uso de energia fóssil (mais poluente).

Em relação ao transporte coletivo, verifica-se melhora no nível de eficiência uma vez que o GWP e PED, por passageiro de cada veículo, reduz nos cenários em que há intervenções no transporte público, em relação ao cenário “Nada a Fazer 2010” e “Nada a Fazer 2020”. Dessa forma, cabe o reconhecimento que as melhorias e os investimentos no transporte coletivo, propostos pelo PDTU, aumentam a eficiência da mobilidade urbana considerando o GWP e PED por passageiro transportado.

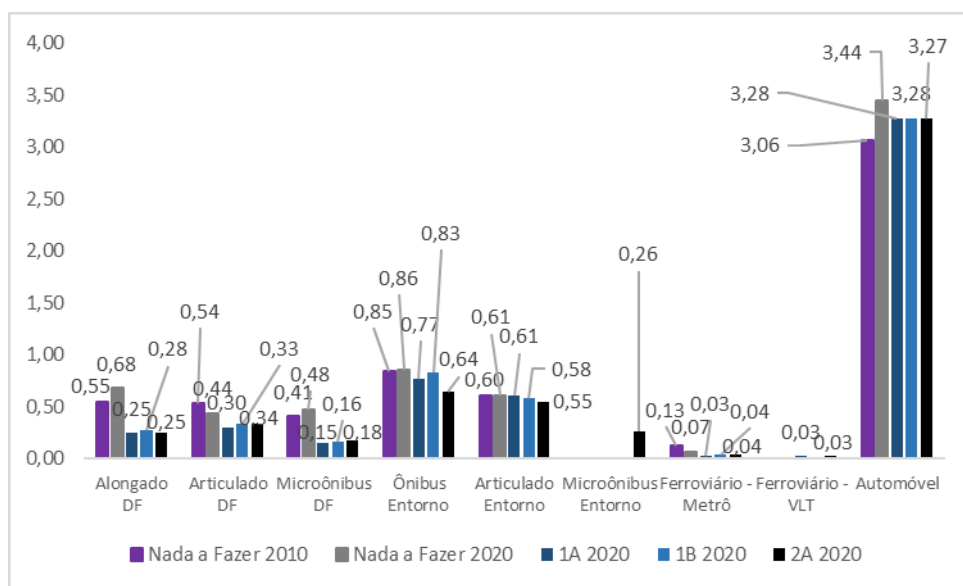


Gráfico 12: GWP / Passageiro, por modal e cenário.

Fonte: elaborado pela autora.

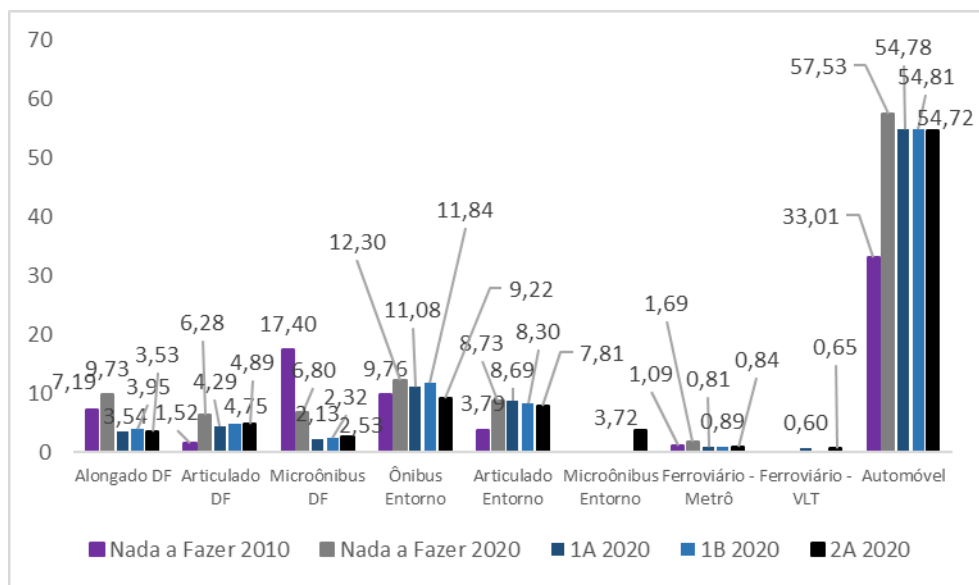


Gráfico 13: PED / Passageiro, por modal e cenário.

Fonte: elaborado pela autora.

5.2 GWP e PED por (Passageiro x Km)*Hora

O indicador que multiplica a quantidade de passageiros pela velocidade média, ou seja, avalia o GWP e o PED em relação à quantidade de passageiros transportados ao longo dos quilômetros, dentro do intervalo de 1 hora. Em termos de mobilidade urbana, isso significa que o ideal é que se emita menos GWP e utilize menos PED por passageiro, além de garantir que ele chegue mais rápido ao seu destino. Dessa forma, quanto menor esse indicador, mais eficiente é aquele transporte.

Conforme o Gráfico 14 e o Gráfico 15, o automóvel mais uma vez se configura como o modal mais ineficiente. O cenário “Nada a Fazer 2020” é o que apresenta os maiores níveis de ineficiência de GWP e PED, uma vez que nele não há melhorias no transporte coletivo, e por isso, o transporte individual é ainda mais incentivado. Para este indicador, todos os cenários futuros que consideram intervenções no transporte público possuem melhor eficiência em relação aos modais desse tipo de transporte, em relação ao cenário “Nada a Fazer 2010” e também ao cenário “Nada a Fazer 2020”. Esse fator evidencia o quanto melhorias no transporte público devem ser incentivadas. Além de melhorarem a qualidade de vida da população em relação a indicadores sociais, também melhoram em termos de meio ambiente e economia, pois diminuem o nível de emissões de gases de efeito estufa, assim como o consumo de energia.

O automóvel, além de possuir valores de GWP e PED maiores em termos absolutos, também possui valores muito maiores quando compara-se GWP e PED em relação à quantidade de passageiros transportados, em 1 hora, ao longo das distâncias. Vale ressaltar que mesmo nos cenários em que há intervenções no transporte público, o automóvel ainda assim aumenta a sua ineficiência em relação ao cenário “Nada a Fazer 2010”, indicando que deve ser um modal a desestimulado, pois o aumento constante do seu uso acarreta em maior ineficiência para o sistema.

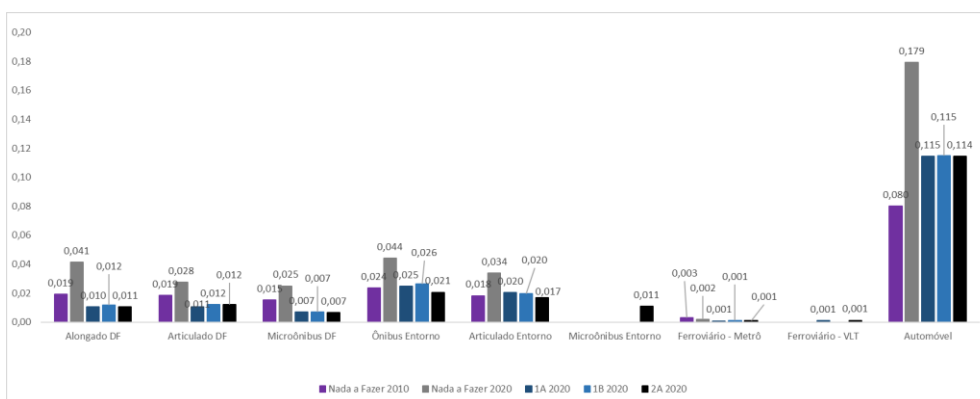


Gráfico 14: GWP / Passageiros X Velocidade média, por modal e cenário.

Fonte: elaborado pela autora.

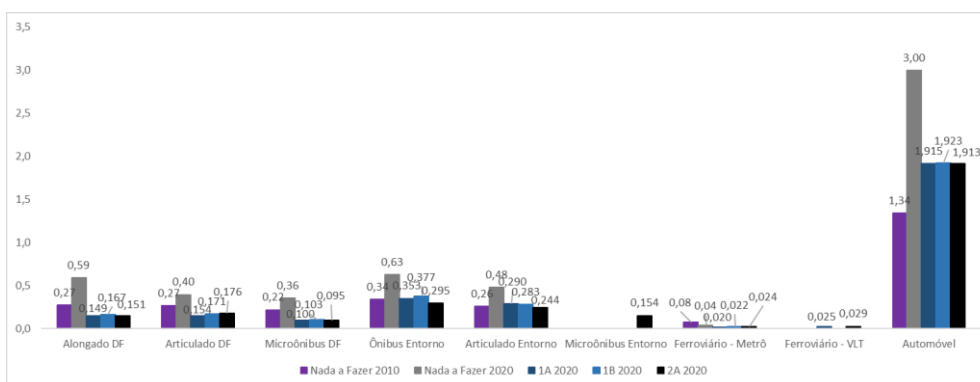


Gráfico 15: PED / Passageiros X Velocidade média, por modal e cenário.

Fonte: elaborado pela autora.

Categorizando o mesmo indicador em termos de transporte coletivo (realizado por ônibus, metrô e/ou VLT, conforme cada cenário) e transporte individual (realizado por automóvel), de acordo com o Gráfico 16 e o Gráfico 17, verifica-se que em tanto para GWP quanto PED, o indicador para automóvel reduz em relação ao cenário “Nada a Fazer 2020”, que possui características sociodemográficas semelhantes, mas aumenta em relação ao cenário “Nada a Fazer 2010”, evidenciando que o futuro pode trazer uma

realidade pior em termos de eficiência energética e ambiental, para o transporte individual.

Considerando os cenários futuros 1A, 1B e 2A, constata-se que a alternativa mais eficiente em relação a esse indicador é a 2A, tanto para o transporte coletivo, quanto para o individual. A eficiência do transporte coletivo aumenta nos cenários de intervenções, em relação a “Nada a Fazer 2010” e “Nada a Fazer 2020”, evidenciando que as projeções elaboradas pelo PDTU podem trazer uma realidade mais eficiente, caso as alternativas sejam de fato implementadas.

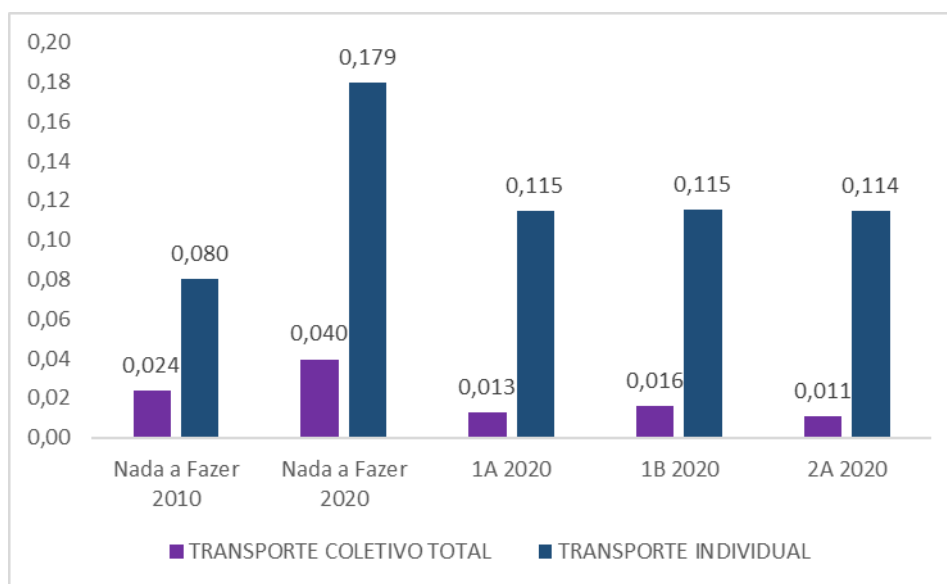


Gráfico 16: GWP / Passageiros X Velocidade média, entre transporte coletivo e individual, por cenário.

Fonte: elaborado pela autora.

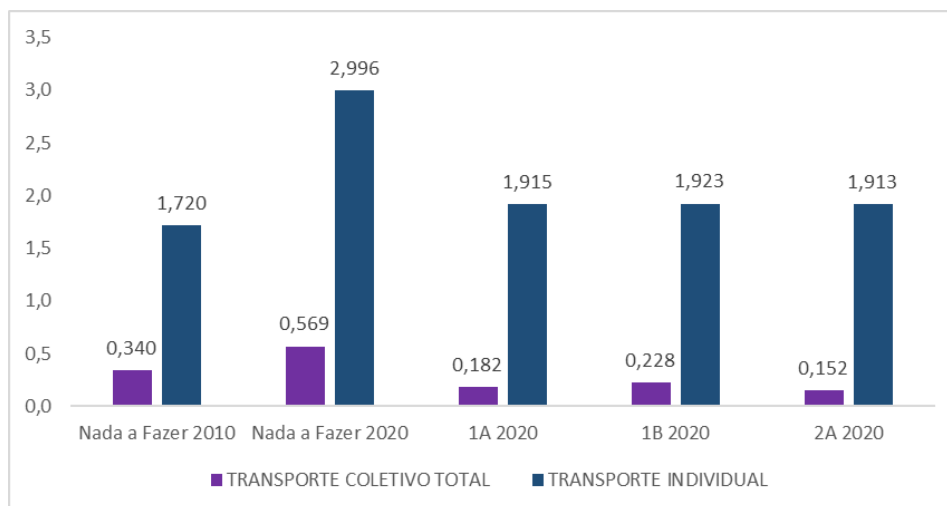


Gráfico 17: PED / Passageiros X Velocidade média, entre transporte coletivo e individual, por cenário.

Fonte: elaborado pela autora.

Avaliando este indicador, verifica-se que em termos de GWP, o transporte individual pode ser de 3 até 10 vezes mais ineficiente que o transporte coletivo. Isso significa que emite até 10 vezes mais do que o transporte coletivo. Essa diferença aumenta conforme os cenários, uma vez que as intervenções propostas pelo PDTU aumentam a eficiência do transporte coletivo, tornando o transporte individual mais ineficiente, em comparação ao transporte coletivo. No cenário “Nada a Fazer 2020”, o indicador do automóvel possui maior valor, pois como nesta alternativa não há intervenções no transporte coletivo, há um incremento do uso do transporte individual. Esse pode ser um efeito “bola de neve”, em que se constata o seguinte: como não há investimentos no transporte coletivo, a população migra ainda mais para o transporte individual. Esse tipo de transporte, que naturalmente ocupa mais espaço por transportar menos pessoas, aumenta os congestionamentos. Além disso, quanto menor a velocidade de um veículo, maior vai ser seu fator de emissão de GEE. Dessa forma, a velocidade média reduz, a quantidade de passageiros transportados nas distâncias reduz, e a emissão e o consumo de energia aumentam.

Verificando-se em termos de PED, a diferença entre o transporte individual e coletivo é ainda maior. O transporte individual consome energia de 5 a 12 vezes mais! Esse fator também pode ser explicado pela relação descrita acima, pois quando não há

investimentos em transporte coletivo, a população aumenta o uso do automóvel, e compromete a eficiência energética e ambiental de todo o sistema.

Percentualmente, o indicador tanto de GWP e PED para o transporte individual aumenta em 124% no cenário Nada a Fazer 2020, e em torno de 40% nos demais cenários, enquanto para o transporte coletivo, esse valor aumenta em 67% no cenário Nada a Fazer 2020, mas reduz em torno de 40% nos demais cenários.

O PDTU (GDF, 2010) elabora três alternativas de transporte público com o objetivo de avaliar e indicar estrategicamente a mais eficiente sob o ponto de vista do usuário do transporte coletivo, pois considera a que apresenta maior melhoria na acessibilidade a esse transporte e na mobilidade da população. Dessa forma, indica as alternativas tipo 1. No entanto, sob o ponto de vista ambiental e energético, a melhor alternativa seria a tipo 2, considerando os gráficos acima, que evidenciam que para este indicador, por ser o cenário que possui o menor valor.

5.3 GWP e PED por Índice de Passageiro por Quilômetro (IPK)

Considerando as emissões e a demanda de energia primária relativas à quantidade de passageiros transportada por quilômetro, o transporte individual também possui níveis maiores. Isso significa que também para a normalização em termos do indicador IPK, o transporte individual é mais ineficiente. Também para esta análise, as alternativas futuras do PDTU que possuem intervenções no transporte público apresentam melhoria na eficiência ambiental e energética, em relação aos dois cenários “Nada a Fazer”. Para o transporte individual, a ineficiência aumenta em todos as projeções. O gráfico abaixo também evidencia a alternativa 2 como a mais eficiente ambiental e energeticamente.

Para verificar essa análise de forma mais precisa, o indicador será retratado em termos de transporte coletivo e transporte individual, conforme o Gráfico 18. Tanto GWP e PED pelo IPK, verifica-se que no cenário “Nada a Fazer 2010”, o transporte individual (o carro) é cerca de 100 vezes mais ineficiente que o transporte coletivo (ônibus, metrô e VLT). Conforme são feitas intervenções positivas no transporte público (ou seja, cenários 1A, 1B e 2), essa diferença aumenta ainda mais: o carro se torna até 400 vezes mais ineficiente que o transporte coletivo. Isso ocorre porque a ineficiência

do carro é sempre alta, enquanto melhorias no transporte coletivo aumentam a sua eficiência e tornam o carro relativamente mais ineficiente ainda.

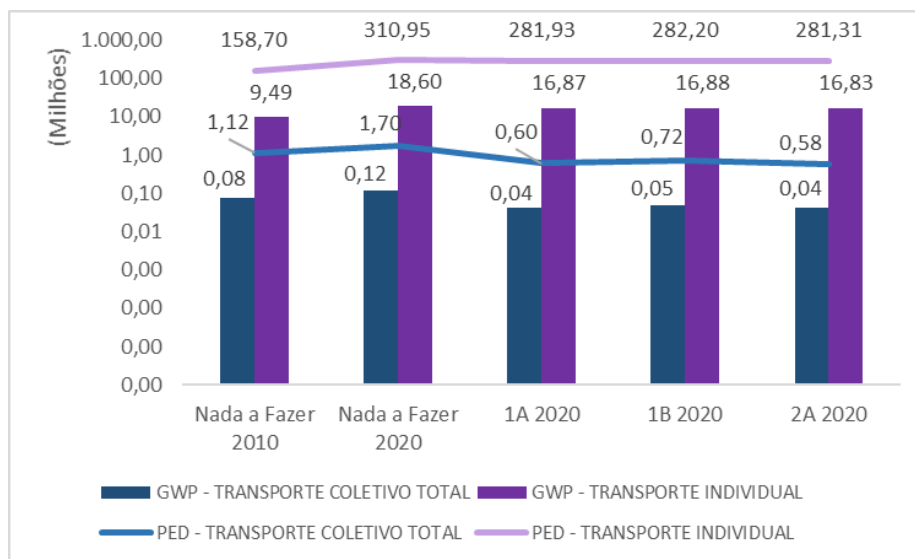


Gráfico 18: GWP e PED por IPK, entre transporte coletivo e individual, por cenário (em log 10).

Fonte: elaborado pela autora.

Esse indicador possui pontuação melhor para as alternativas 1A e 2 devido ao maior investimento no ônibus articulado, que transporta mais pessoas no mesmo veículo, e também porque são os cenários que possuem mais intervenções no modal ferroviário, em relação ao cenário 1B.

A variação percentual dos cenários futuros, em que há intervenção no transporte público, ou seja, os cenários 1A, 1B e 2, em relação ao cenário futuro “Nada a Fazer”, apresentam melhorias no valor total de GWP e PED, de acordo com o Gráfico 19. O cenário que apresenta a menor queda, cerca de 7% para GWP e PED, é o 1B, que é o que possui menos investimentos no transporte ferroviário, movido a eletricidade – considerada uma fonte de energia limpa. O cenário 1A e 2 incluem o Veículo Leve sobre Trilhos (VLT), enquanto no cenário 1B, o mesmo trajeto que seria realizado por VLT, seria realizado por ônibus em faixa exclusiva.



Gráfico 19: Variação percentual do TOTAL de GWP e PED, em relação ao cenário "Nada a Fazer 2020".

Fonte: elaborado pela autora.

5.4 Considerações sobre as alternativas

Apesar dos valores totais de GWP e PED crescerem em relação ao cenário "Nada a Fazer 2010", em relação a cenário "Nada a Fazer 2020" apresentam queda. Isso significa que as intervenções propostas pelo PDTU podem reduzir as emissões de GEE e a demanda de energia primária, para a mesma situação sociodemográfica.

Em valores absolutos (em milhões), o cenário Nada a Fazer 2010 emite 0,82 kg de CO₂-equiv., enquanto no cenário Nada a Fazer 2020 esse valor é de 1,37 de kg de CO₂-equiv., e nos demais cenários futuros não existe variação muito significativa, sendo a emissão na ordem de 1,25 de kg de CO₂-equiv. Já em termos de PED, o cenário Nada a Fazer 2010 consome 13,29 MJ, no cenário Nada a Fazer esse valor é de 22,33 MJ. O cenário futuro que menos consome energia é o cenário 1 A (22,33 MJ), seguido do cenário 2 (22,59 MJ), sendo o maior consumidor em termos absolutos o cenário 1B (20,71), que é o que considera menos incrementos no modal ferroviário. A maior variação, relacionada ao cenário referência 2010, é caracterizada pelo cenário 1 A, que apesar de aumentar, possui o menor crescimento do valor absoluto, sendo 52% para GWP e 54% para PED.

Em termos relativos, o cenário de maior eficiência energética e ambiental é o cenário 2, que é justamente o que realiza investimentos mais significativos no modal ferroviário.

Isso significa que em termos de passageiros transportados, no cenário Nada a Fazer 2010, o ônibus alongado do DF emite 0,55 kg CO₂-equiv. por passageiro e consome 7,19 MJ por passageiro, no cenário 2 esse mesmo ônibus emite 0,25 kg de CO₂-equiv. por passageiro e consome 3,53 MJ por passageiro. Já o automóvel no cenário Nada a Fazer 2010 emite 3,06 kg de CO₂-equiv. por passageiro e consome 33,01 MJ, no cenário 2, emite 3,27 kg de CO₂-equiv. por passageiro e consome 54,72 MJ. O ônibus alongado é o veículo que mais realiza viagens do transporte público do DF, enquanto o automóvel realiza todas as viagens do transporte individual motorizado. Esses valores indicam o quanto o automóvel emite e consome muito mais por passageiro, e, portanto, impacta muito mais o meio ambiente. Além disso, ressalta o ganho de eficiência por passageiro no transporte coletivo, ao se realizarem as medidas propostas pelo PDTU (GDF, 2010).

Considerando o indicador que avalia em termos de passageiros transportados na distância percorrida e no tempo gasto, no cenário Nada a Fazer 2010 o ônibus alongado do DF emite 0,019 kg de CO₂-equiv. e consome 0,22 MJ por passageiros transportados por quilômetros por hora, enquanto no cenário 2 2020, emite 0,011 kg de CO₂-equiv. e consome 0,151 MJ por passageiros transportados por quilômetros por hora. O automóvel, no cenário Nada a Fazer 2010 emite 0,08 kg de CO₂-equiv. e consome 1,34 MJ por passageiros transportados por quilômetros por hora, e no cenário 2 2020, emite 0,114 kg de CO₂-equiv. e emite 1,913 MJ por passageiros transportados por quilômetros por hora. Mais uma evidência do ganho de eficiência no transporte coletivo, mas aumento da ineficiência no transporte individual.

Em termos do indicador que considera os passageiros transportados por quilômetro (IPK), em milhões, no cenário Nada a Fazer 2010 o transporte coletivo emite 0,08 kg de CO₂-equiv. e consome 1,12 MJ, e no cenário 2 2020 emite 0,04 kg de CO₂-equiv. e consome 0,58 MJ. Dessa forma, verifica-se que há aumento da eficiência tanto para a métrica de GWP quanto de PED. Enquanto isso, para o mesmo indicador, no cenário Nada a Fazer 2010, o transporte individual emite 9,49 kg de CO₂-equiv. e emite 158,70 MJ, e no cenário 2 2020 esses valores aumentam para 16,83 kg de CO₂-equiv. e 283,31 MJ.

Conforme o Relatório do Comitê de Revisão do Plano Diretor de Transporte Urbano e Mobilidade do Distrito Federal (GDF, 2014), que tem como objetivo verificar o andamento das ações propostas pelo PDTU, avalia que muitas medidas que priorizam o modo coletivo ainda estão em fase de elaboração, desenvolvimento e estruturação. Sobre o sistema integrado, que visa eficiência na prestação do serviço e racionalidade operacional, o Relatório julga que as ações "estão muito aquém do desejado". Além disso, a licitação do serviço básico do STPC/DF não melhorou as condições de mobilidade dos usuários. Sobre a rede ferroviária, apesar dos recursos financeiros disponíveis advindos do Governo Federal (PAC), entraves técnicos como a falta de projetos de engenharia, estudos de viabilidade e ambientais, além de entraves burocráticos dos órgãos gestores, dificultaram a implementação de melhorias significativas. Outra melhoria que não foi implementada refere-se às linhas transversais no Plano Piloto, com o objetivo de reduzir o estrangulamento do trânsito no sistema viário principal. Constata-se que apesar de serem indicadas estratégias claras que priorizam o modo coletivo, a dificuldade de implementação torna o cenário desfavorável sobre as dimensões sociais, econômicas e ambientais. Apesar do PDTU (GDF, 2010) propor estratégias que buscam a melhoria do serviço para o usuário, e dessas estratégias serem mais eficientes do ponto de vista ambiental, energético e, portanto, econômico, a população ainda não recebeu seus benefícios devido à falta de implementação.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os danos ambientais e energéticos do transporte coletivo e transporte individual poderiam ser reduzidos caso fossem utilizados combustíveis que não derivem de fontes de energia fóssil, devido às suas características poluentes, e também devido à menor eficiência energética dessas fontes de energia, conforme indica a literatura discutida neste trabalho. Além disso, a taxa de motorização também influencia para que os carros atuem como uma eficiência ainda mais baixa. Deve-se considerar também a questão da alta representatividade do transporte individual na produção de viagens. Segundo o PDTU (2010), cerca de 50% das viagens são feitas por esse modo, enquanto ele é responsável por 80% das emissões e do consumo de energia do sistema, de acordo com as análises das alternativas.

A representatividade da gasolina nos valores de GWP e PED cresce em todas as projeções futuras. Essa representatividade está na faixa de 80% a 85% em relação ao total absoluto. Já a representatividade do diesel reduz. Em 2010, o diesel foi responsável por cerca de 20% de GWP total, mas nos cenários 2020, essa representatividade reduz para cerca de 14% nos cenários do tipo 1 e 2, apesar do número de passageiros transportados por esse modal aumentar. A eletricidade possui baixa representatividade em todas as situações, mesmo naquelas em que há grande incentivo ao modal ferroviário. No entanto, a eletricidade é considerada uma fonte de energia limpa na sua fase de consumo. Isso justifica a necessidade de maiores investimentos nesse modal, ou em veículos que façam uso dessa fonte de energia.

Apesar do **transporte coletivo** apresentar crescimento nos valores totais de GWP e PED em todos os cenários, quando avalia-se esses valores em termos de passageiros transportados, “passageirosXkm/h”, e IPK, os cenários elaborados pelo PDTU garantem **maior eficiência** ao sistema. No entanto, devido à alta representatividade do **transporte individual** na produção de viagens, o ganho alcançado pelas melhorias no transporte público pode ser reduzido pelos danos causados pelo transporte individual, que além de aumentarem os seus valores totais de GWP e PED, também **reduzem a eficiência** de forma relativa, considerando os indicadores avaliados.

Basicamente, verifica-se que um incremento na quantidade de passageiros transportados pelo transporte público, reduz os níveis de GWP e PED, enquanto no transporte individual, ocorre o contrário. Em termos absolutos, o GWP e PED da gasolina aumenta cerca de 60% em todos os cenários, o do diesel aumenta em 30% no cenário Nada a Fazer 2020, mas aumenta menos de 10% nos outros cenários. A eletricidade apresenta variação elevada pois nos cenários sem intervenção, possuem pouca representatividade no sistema, portanto esse aumento já era esperado. O total de GWP e PED aumentam em 68% no cenário Nada a Fazer 2020, e aproximadamente 55% nos demais cenários. O uso excessivo da gasolina (representado pelo automóvel) possui a maior parcela de culpa nos impactos ambientais da mobilidade urbana do DF.

A forte influência ambiental e energética do transporte individual dificulta que as intervenções positivas no transporte coletivo gerem ganhos no saldo final, uma vez

que o transporte feito por automóveis (e ainda por cima movidos a gasolina) é altamente ineficiente e o seu uso excessivo traz impactos severos ao meio ambiente, à economia, e à sociedade, prejudicando o sistema de mobilidade urbana com um todo.

Dois fatores chamam atenção quando se avalia esse sistema de mobilidade urbana, tanto sobre GWP quanto PED: a alta representatividade do transporte individual, mesmo nos cenários de maiores incrementos no transporte coletivo, que realiza 50% das viagens mas emite e consome cerca de 80% do total de GWP e PED; e o modal ferroviário que possui baixa representatividade na produção de viagens, mas mesmo quando essa representação aumenta, não há aumento equivalente em GWP e PED, configurando esse modal como o que utiliza energia mais limpa em relação aos demais, que fazem uso de fontes de energia fóssil (basicamente gasolina e diesel).

O desenvolvimento sustentável está pautado na busca por uma sociedade mais justa, por uma economia viável, sem causar danos severos ao meio ambiente (e, portanto, à própria população). O PDTU escolhe a alternativa que prioriza o aspecto social. Esta pesquisa verificou que a alternativa não escolhida seria a mais eficiente do ponto de vista ambiental e energético, e, portanto, econômico, que é justo aquela que faz mais intervenções positivas no modal que faz uso da energia mais limpa (o ferroviário). Não seria mais interessante uma estratégia priorize as três dimensões do desenvolvimento sustentável?

Outro questionamento pertinente: o quanto o sistema de mobilidade urbana do DF e Entorno está contribuindo para uma cidade sustentável? Considerando os conceitos de metabolismo urbano e cidade sustentável discutidos nos capítulos iniciais desse trabalho, verifica-se que o sistema de mobilidade urbana não pode fazer suas contribuições nesse sentido, uma vez que esses conceitos que explicitam a necessidade da busca por eficiência energética, além da redução de poluição. Nenhum desses fatores são alcançados de forma significativa no atual sistema. As entradas, representadas pela demanda de energia primária (PED), e as saídas, representadas pelas emissões de GEE (GWP), são ambas drasticamente impactadas pelo elevado consumo de gasolina do sistema. Esse valor é ainda mais agravado pelas diversas características de ineficiência advindas não só do consumo combustível fóssil, como também pela baixa capacidade

de transporte do automóvel, pelo alto consumo de espaço, e pela influência nos congestionamentos. Dessa forma, mesmo que o transporte individual faça uso de energia limpa, como os carros elétricos, deve-se verificar o ganho de eficiência também em termos de passageiros transportados, quilometragem percorrida e tempo de viagem. Essa pesquisa concluiu que a migração para o transporte individual acarreta em um problema tipo “bola de neve”, pois devido a essas características do automóvel, o excesso de carros nas ruas causa um aumento nos congestionamentos, reduzindo o tempo de viagem e aumentando os níveis de poluição.

A característica dispersa de algumas regiões do DF e Entorno e a concentração de postos de trabalho no centro do DF (além de “facilitarem” o uso do automóvel) dificultam a implementação de uma estratégia de transporte mais eficiente, mas não impossibilitam. Em termos de fontes de energia, verifica-se o sistema de mobilidade urbana do DF e Entorno é abastecido majoritariamente por fontes de energia fóssil, consideradas as mais ineficientes. Apesar de haver diversos estudos de avaliação de ciclo de vida e demais métricas ambientais que indicam que outras fontes de energia limpa já são viáveis, como os ônibus movidos a hidrogênio e os carros elétricos, não há representatividade dessas fontes de energia limpa no nosso sistema.

O Brasil tem se comprometido com diversas diretrizes internacionais que tem como objetivo a redução de gases de efeito estufa, como o Acordo de Paris. Apesar disso, os potenciais de aquecimento global do sistema de mobilidade urbana do DF aumentam com o passar dos anos, pelo menos até o horizonte de 2020. Brasília é a capital do país e poderia ser referência. Comprometer-se em políticas e diretrizes que não são implementadas e não avançar significativamente no uso de energias mais limpas não nos levará a um desenvolvimento sustentável, pelo menos não tão cedo. Até quando teremos uma cidade dos carros?

REFERÊNCIAS

- ACSERALD, H. Discurso de sustentabilidade. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 1, p. 79-91, 1999.
- ALBERTI, M. Modeling the urban ecosystem: conceptual framework. **Environmental and Planning B: Planning and Design**, v. 26, p. 605-630, 1999.
- ANDRADE, A. L. C.; MATTEI, L. Consumo energético e emissões de CO₂: uma análise do setor de transportes brasileiro. In: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA, 39., 2011, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ANPEC, 2011.
- ANTP. (Associação Nacional de Transportes Públicos). **Sistema de informação da mobilidade urbana: relatório comparativo 2003-2013**. São Paulo: 2015.
- ANTT. (Agência Nacional de Transportes Terrestres) **Anuário estatístico de transportes terrestres, 2010**. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br>>
- AYRES, R. U.; AYRES, L. W. **A handbook of industrial ecology**. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing, 2002. 701 p.
- BARCZAK, R.; DUARTE, F. Impactos ambientais da mobilidade urbana: cinco categorias de medidas mitigadoras. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 4, n. 1, p. 13-32, 2012.
- BARTOLOZZI, I.; RIZZI, F.; FREY, M. Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: A case study in Tuscany, Italy. **Applied Energy**, v. 101, p. 103-111, 2013.
- BOARETO, R. A política de mobilidade urbana e a construção de cidades sustentáveis. **Revista de Transportes Públicos ANTP**, São Paulo, v. 4, p. 143-160, 2008.
- BOHRINGER, C.; JOCHEM, P. E. P. Measuring the immeasurable – A Survey of sustainability indices. **Ecological Economics**, v. 63, p. 1-8, 2007.
- BRASIL. (Ministério das Cidades). **Política Nacional de Mobilidade Urbana Sustentável**. Brasília, DF, 2004. (Cadernos Ministério das Cidades).
- BRASIL. (Ministério do Meio Ambiente). **A NDC do Brasil no contexto do Acordo de Paris**. Convenção Quadro das Nações Unidas sobre o Clima. Acordo de Paris. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 17 mar. 2016.
- BRASIL. (Ministério do Meio Ambiente). **Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviário 2013 – ano base 2012: relatório final**. Brasília, DF: MMA, 2014.

BRIGUGLIO, F. et al. Renewable energy for hydrogen production and sustainable urban mobility. **International journal of Hydrogen**, v. 35, p. 9996-10003, 2010.

BRUNNER, P.; H. Reshaping Urban Metabolism. **Journal of Industrial Ecology**, v. 11, n. 2, p. 11-13, 2007.

CAMPOS, V. B. Uma visão da mobilidade urbana sustentável. **Revista de Transportes Públicos ANTP**, São Paulo, v. 2, p. 99-106, 2006.

CHESTER, M. et al. Infrastructure and automobile shifts: positioning transit to reduce life-cycle environmental impacts for urban sustainability goals. **Environmental Research Letters**, v. 8, 015041, 2013.

CNT. (Confederação Nacional do Transporte). **Anuário CNT do Transporte, 2017**. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2017/Rodoviario/1-5-1-/Transporte-p%C3%BAblico-urbano>>

CONKE, I. S. **Barreiras ao desenvolvimento de coleta seletiva**. 2015. 199 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

COSTA, M. S. **Um Índice de Mobilidade Urbana Sustentável**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

D'AMORE, F.; BEZZO, F. Strategic optimisation of biomass-based energy supply chains for sustainable mobility. **Computers and Chemical Engineering**, v. 87, p. 68-81, 2016.

DENATRAN. (Departamento Nacional de Trânsito). **Frota do DF por tipo de combustível**. 2017. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/0B5mVgY7cm6_FejVXQ0RxNnpVYzQ/view>. Acesso em: 20 jun. 2017.

DETRAN. (Departamento de Trânsito do Distrito Federal). **Frota de veículos registrados no Distrito Federal, março 2016**. Brasília, DF, 2013. Disponível em: <http://www.detran.df.gov.br/images/03_marco_2016_frota.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2016.

DETRAN/DF. (Departamento de Trânsito do Distrito Federal). **Frota de veículos registrados no Distrito Federal, maio 2017**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <<http://www.detran.df.gov.br/o-detran/estatisticas-do-transito/frota-de-veiculos.htm>>. Acesso em: maio de 2017.

DIAS, G. F. **Pegada ecológica e sustentabilidade humana**. São Paulo: Gaia, 2002.

EPE. (Empresa de Pesquisa Energética). **Demanda de energia 2050**. Nota Técnica DEA 13/14. Rio de Janeiro, 2014. (Série Estudos da Demanda de Energia).

- EUROFORUM. The European Research Forum for Urban Mobility (EUROFORUM), 2007.
- FARIA, R. et al. A sustainability assessment of electric vehicles as a personal mobility system. **Energy Conversion and Management**, v. 61, p. 19-30, 2012.
- FÉRES, J.G. Desatando o nó górdio: regulação e mobilidade urbana. **Econômica**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 51-63, 2013.
- FISCHER-KOWALSKI, M. Exploring the History of Industrial Metabolism. In: AYRES, R.U.; AYRES, L. W. (Eds). **A Handbook of Industrial Ecology**. Cheltenham, UK: Edward Edgar, 2002. Cap. 2, p. 16-26.
- FRISCHKNECHT, R.; FLURY, K. Life cycle assessment of electric mobility: answers and challenges – Zurich, April 6, 2011. **International Journal of Life Cycle Assess**, v. 16, p. 691-695, 2011.
- GDF. (Governo do Distrito Federal). **Plano Diretor de Transporte urbano e Mobilidade do Distrito Federal e Entorno (PDTU)**. Relatório Final. Brasília, DF: Secretaria de Estado de Transportes, 2010. Disponível em: <http://editais.st.df.gov.br/pdtu/final/relatorio_final.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2016.
- GDF. (Governo do Distrito Federal). **Relatório do Comitê de Revisão Plano Diretor de Transporte Urbano e Mobilidade do Distrito Federal – PDTU/DF**. Brasília, DF, 2014. 48 p. Disponível em: <http://editais.st.df.gov.br/pdtu/revisao_pdtu.pdf> Acesso em: abril de 2017.
- GOMIDE, A. A. **Transporte Urbano e Inclusão Social: Elementos para Políticas Públicas**. Brasília, DF: IPEA, 2003. (Texto para discussão, n. 960).
- GRAEDEL, T. A Handbook of Industrial Ecology. British Library, 2001.
- GUDMUNDSSON, H. Sustainable Transport and Performance Indicators. In: HESTER, R.E; HARRISON, R.M. (Eds). **Issues in Environmental Science and Technology**, n.20, p.35-63, 2004.
- IIED. (International Institute for Environment and Development). **Urban environmental improvement and poverty reduction**. London: IIED, 2001. 94 p.
- IPCC. (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2009, Oslo, Norway. **Report IPCC Expert Meeting on the Science of Alternative Metrics**. Oslo: SFT, 2009.
- KAHN, J. R. **The Economic Approach to Environmental and Natural Resources**. 3ª. ed. Estados Unidos: Thomson South-Western, 2005.
- KENNEDY, C.; CUDDIHY, J.; ENGEL-YAN, J. The Changing Metabolism of Cities. **Journal of Industrial Ecology**, v. 11, n. 2, p. 43-60, 2007.

KLOPPFER, W. Editorial – In Defense of the Cumulative Energy Demand. **International Journal of Life, Cycle Assessment**, v. 2, n. 2, p. 61, 1997.

LITMAN, T.; BURWELL, D. Issues in sustainable transportation. **International Journal Environmental Issues**, v. 6, n. 4, p. 331-347, 2006.

MARX, R. et al. Spatial contexts and firm strategies: applying the multilevel perspective to sustainable urban mobility transitions in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 1092-1104, 2015.

MILLER, P. et al. Analyzing the sustainability performance of public transit. **Transportation Research Part D**, v. 44, p. 177-198, 2016.

MOEINADDINI, M.; ASADI-SHEKARI, Z.; SHAH, M. Z. An urban mobility index for evaluating and reducing private motorized trips. **Measurement**, v. 63, p. 30-40, 2015.

MORI, K.; CHRISTODOULOU, A. Review of sustainability indices and indicators: Towards a new City Sustainability Index (CSI). **Environmental Impact Assessment Review**, v. 32, p. 94-106, 2012.

NEGRÃO, A. P. **Análise econômica dos custos ambientais das emissões de CO₂ do transporte rodoviário para a cidade de Manaus**. 2013. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.

OECD. (Organisation for Economic Cooperation and Development). **Towards sustainable transportation**. Vancouver Conference, Canadá, 1996.

PECI, A. Modelos regulatórios na área de transportes: a experiência americana. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DO CLAD SOBRE A REFORMA DO ESTADO E DA ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA, 7., 2002, Lisboa, Portugal. **Anais...** Lisboa: CLAD, 2002.

PONTES, T. F. Avaliação da mobilidade urbana na área metropolitana de Brasília. 2010. 275 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

PROCONVE: Programa de Controle de Poluição do ar por veículos automotores. 2012. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/163/arquivos/proconve_163.pdf Acesso em: junho de 2017.

REES, W.; WACKERNAGEL, M. Urban Ecological Footprints: why Cities Cannot Be Sustainable – and why they are a key to Sustainability. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 16, p. 223-248, 1996.

RIBEIRO, K. et al. Transport and its infrastructure. In: METZ, O. R. et al. (Eds). **Climate Change 2007: Mitigation**. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. p. 325-380.

RODRIGUES, S. et al. Aspectos geopolíticos das mudanças climáticas. **Plenarium**, Brasília, DF, v. 5, n. 5, p. 84-94, 2008.

SHINE, K. P. The global warming potential – the need for an interdisciplinary retrieval. **Climatic Change**, v. 96, p. 467-472, 2009.

UN. (United Nations). **A/RES/71/256. New Urban Agenda**. Resolution adopted by the General Assembly on 23 December 2016. Seventy-first session. 2017. Disponível em: <http://www.un.org/ga/search/viewm_doc.asp?symbol=a/res/71/256>. Acesso em: 20 mar. 2017.

UNEP. (United Nations Environment Programme). **Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products**. Nairobi, 2009. 104 p.

UN-HABITAT. **Planning and Design for Sustainable Urban Mobility: Policy Directions**. United Nations Human Settlements Programme, Nairobi; Earthscan from Routledge, Abingdon, 2013.

USÓN, A. A. et al. Energy efficiency in transport and mobility from an eco-efficiency viewpoint. **Energy**, v. 36, p. 1916-1923, 2011.

VASCONCELLOS, E. A. **Transporte e mobilidade urbana**. Brasília, DF: CEPAL. Escritório no Brasil; IPEA, 2011.

VASCONCELLOS, E. A. **Transporte urbano nos países em desenvolvimento: reflexões e propostas**. São Paulo: Editora Unidas, 1996.

VASCONCELOS, E.A. Desvendando a política brasileira de mobilidade urbana. **Revista de Transportes Públicos**, v. 27/28, p. 11-36, 2005.

VEÍCULOS x emissões x combustível – influência da qualidade do combustível nas tecnologias de redução das emissões de veículos diesel pesados e leves. Anfavea, 2008. 12 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/.../Item3.1_PROCONVE-ApresVeicsEmissComb-Henri_ANFAVE...> Acesso em: junho de 2017.

VIVANCO, D. F.; KEMP, R.; van der VOET, E. The relativity of eco-innovation: environmental rebound effects from past transport innovations in Europe. **Journal of Cleaner Production**, v. 101, p. 71-85, 2015.

WBCSD. (World Business Council for Sustainable Development). **Sustainable Urban Mobility**. 2. Ed. Geneva, 2015. 78 p.

WEINBERG, J.; KALTSCHMITT, M. Life cycle assessment of mobility options using wood based fuels – Comparison of selected environmental effects and costs. **Bioresource Technology**, v. 150, p. 420–428, 2013.

WILLIAMS, R. **A Definition of Sustainable Mobility**. 2007. Disponível em: <http://www.carbonsmart.com/files/definition_of_sustainable_mobility_2007mar15.pdf>. Acesso em: 28 set 2016.

