

Análise de Viabilidade da Substituição de Ônibus a Diesel por Ônibus a Gás e/ou Biometano em Goiás

Luiz Gustavo Silva de Oliveira
Edgar Barassa

Marcelo Ferreira Tete

Guilherme Botelho Meireles de Souza
Lucas Clementino Mourão



Relatório de
Viabilidade Técnico-
Econômica e de
Impacto Ambiental

SUMÁRIO

1.	Introdução	5
2.	Mobilidade sustentável e suas possíveis trajetórias	10
2.1	Perspectivas sobre a mobilidade urbana e transporte público	10
2.2	Rotas tecnológicas possíveis para o transporte público de baixo carbono	11
2.3	A descarbonização do transporte coletivo pesado mundo afora: tendências e alternativas	13
2.4	Recomendações para a tomada de decisão.....	15
3.	Metodologia.....	16
4.	O Business Case dos ônibus a gás natural veicular (GNV) e biometano	19
4.1	O caso do ônibus articulado para operações de BRT	22
4.2	Cenários para tamanho de frotas a serem substituídas	22
5.	Análises do custo total de propriedade e emissões	23
5.1	Análise do Custo Total de Propriedade Nivelado (TCOn).....	23
5.2	Composição do TCOOn	24
5.3	Análise de Emissões	25
5.4	O caso dos ônibus articulados a biometano	26
5.5	Cenários de introdução de frotas	27
6.	Análises de Sensibilidades.....	30
6.1	Resultados da Análise de Sensibilidade.....	31
6.2	Resultados da análise de sensibilidade para os cenários de diferentes frotas.....	34
6.2.1	Sensibilidade nos investimentos totais em frota (CAPEX do ônibus)	34
6.2.2	Sensibilidade nos custos totais com combustíveis	35
6.2.3	Sensibilidade nas emissões de GEE.....	38
7.	Considerações finais	40
7.1	Conclusões do Estudo e Simulações	40
7.2	Recomendações para Tomada de Decisão	41
8.	Referências.....	43
ANEXO I	46	
Localização de garagens e distribuição da frota da SIT-RMTC	46	
ANEXO II	48	
Análise da mitigação de poluentes locais (CO, NO _x e NPS).....	48	

Lista de Figuras

Figura 1 – Custo total de propriedade (TCO – R\$/km) para as diferentes alternativas tecnológicas	23
Figura 2 – Componentes do Custo total de propriedade (R\$/km).....	24
Figura 3 –Emissões totais de Gases de Efeito Estufa (GEE) – tCO ₂ /ano.....	25
Figura 4 –Mitigação de emissões totais de Gases de Efeito Estufa (GEE) – tCO ₂ /ano	26
Figura 5 – Resultados das análises de sensibilidade – TCO _{On} (R\$/km).....	31
Figura 6 – Resultados das análises de sensibilidade para a alternativa de GNV – TCO _{On} (R\$/km)	32
Figura 7 - Resultados das análises de sensibilidade para a alternativa de Biometano – TCO _{On} (R\$/km) .	33
Figura 8 – Resultados das análises de sensibilidade as emissões e mitigação de emissões de GEE.....	33
Figura 9 – Resultados das análises de sensibilidade para investimentos totais com diferentes CAPEX e para diferentes frotas	35
Figura 10 – Sensibilidade dos Custos Totais com Combustíveis aos preços de gás natural	36
Figura 11 – Sensibilidade dos Custos Totais com Combustíveis aos preços do biometano.....	37
Figura 12 – Sensibilidade dos Custos Totais com Combustíveis às sazonalidades e aos preços do biometano.....	38
Figura 13 – Sensibilidade da mitigação de emissões de GEE às sazonalidades de produção de biometano.....	39
Figura 14: Mapa da localização de garagens e suas respectivas frotas	47
Figura 15: Emissões de poluentes locais: frota de 50 ônibus movidos a Diesel B14 e Gás Natural Veicular ou Biometano	48

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Premissas utilizadas para as análises de simulação econômica	19
Tabela 2 – Fatores de emissão “do poço à roda”	21
Tabela 3: Cenário 50 veículos.....	27
Tabela 4: Cenário 200 veículos.....	27
Tabela 5: Cenário 300 veículos.....	28
Tabela 6: Cenário 450 veículos.....	28
Tabela 7: Cenário 500 veículos.....	28
Tabela 8: Cenário 600 veículos.....	28
Tabela 9 – Variáveis das análises de sensibilidade	30

1. Introdução

Os serviços de transporte coletivo que atendem Goiânia e sua região metropolitana estão estruturados segundo um modelo operacional, de abrangência plurimunicipal, formado por uma rede de linhas conectadas que interligam o município de Goiânia a 18 cidades de seu entorno (CDTC, 2022).

Essa rede, que atende um território com uma população superior a 2,5 milhões de habitantes, é organizada em uma unidade sistêmica, denominada Sistema Integrado de Transportes da Rede Metropolitana de Transportes Coletivos (SIT-RMTC), constituída por uma frota operacional de 1.230 ônibus¹, 5 empresas concessionárias, 8 garagens (vide Anexo I, Figura 14), 293 linhas, 23 terminais, 19 estações de conexão, 2 corredores BRT (*Bus Rapid Transit*)² e 6.949 pontos de parada (Prefeitura Municipal de Goiânia, 2024; CMTC, 2024).

A gestão dos terminais, estações e pontos de ônibus, bem como o gerenciamento do sistema de bilhetagem eletrônica (Sitpass) e o controle das viagens e horários da frota operacional do SIT-RMTC são realizados pelo RedeMob Consórcio, entidade privada criada pelas empresas concessionárias para a operação dos terminais, estações e pontos de ônibus, bem como para a gestão do sistema de bilhetagem eletrônica (Sitpass) e controle das viagens e horários, por meio de uma Central de Controle Operacional pioneira no Brasil (RedeMob Consórcio, 2024b, 2024a)

Todo esse sistema é planejado, gerenciado, controlado e fiscalizado operacionalmente pela Companhia Metropolitana de Transportes Coletivos (CMTC), empresa pública de interesse privado subordinada à Câmara Deliberativa de Transportes Coletivos (CDTC), órgão colegiado presidido pelo Governo do Estado de Goiás, que estabelece a política pública que rege o SIT-RMTC (CMTC, 2024a, 2024b)

O modelo de governança da CDTC tem como principais atores o Governo do Estado de Goiás (representando 16 municípios) e a Prefeitura Municipal de Goiânia, visto que estes arcam, individualmente, com 41,2% do montante concedido às empresas operadoras do transporte coletivo a título de subsídio tarifário (GOIÁS, 2021; Governo de Goiás, 2024a).

Embora esses dois entes principais contribuam igualitariamente na complementação tarifária do SIT-RMTC, cabe destacar o papel de liderança exercido pelo governo estadual à frente da CDTC, não só por ter promovido a reestruturação deste órgão colegiado no ano de 2021, mas por sua atuação destacada, no início do ano de 2022, na formulação das diretrizes e instituição do projeto Nova RMTC, voltado à recuperação e requalificação da prestação dos serviços de transporte público coletivo de passageiros do SIT-RMTC (CDTC, 2022).

Em outubro de 2023, o projeto Nova RMTC foi reestruturado e ampliado pela CDTC que, por sua vez, definiu diretrizes para o desenvolvimento e implantação de subprojetos como a iniciativa

¹ A frota cadastrada para atender a demanda da RMTC, segundo a CMTC, é de 1.321 ônibus (CMTC, 2024b).

² BRT Leste-Oeste (Eixo Anhanguera) e BRT Norte-Sul (Eixo Norte-Sul).

Nova Frota, que consiste na renovação de toda a frota de veículos convencionais atualmente em operação no SIT-RMTC³, bem como a implementação de frota de veículos elétricos para operação no Eixo Anhanguera e, eventualmente, no BRT Norte-Sul (CDTC, 2023). De acordo com a Subsecretaria de Políticas para Cidades e Transporte (Goiás - SGG, 2024), até 2026 serão adquiridos 1.026 ônibus para as linhas alimentadoras, 83 ônibus elétricos para o Eixo Anhanguera e 62 ônibus elétricos para o BRT Norte-Sul.

Ainda em 2023, no mês de dezembro, a CDTC aprovou e instituiu o Plano de Ação Imediata (PAI) com vistas à aceleração de investimentos prioritários, por parte das empresas concessionárias⁴, no âmbito do projeto Nova RMTC. Entre esses investimentos, está a aquisição do primeiro lote de 200 ônibus da Nova Frota, todos com ar-condicionado e tecnologias de propulsão avançadas e mais sustentáveis (diesel Euro VI e elétricos)⁵, com entrega prevista para o primeiro semestre de 2024⁶.

No início do segundo semestre de 2024, a CDTC decidiu pela prorrogação do prazo contratual com as empresas concessionárias por mais 20 anos (5º Termo Aditivo ao contrato de concessão), a contar da data de encerramento dos contratos vigentes, com vistas à implantação de nova fase de investimentos para a revitalização do SIT-RMTC (CDTC, 2024). Como decorrência da celebração dessa quinta aditivação de contrato, ficou definido como obrigação das empresas realizar investimentos no Sistema Metropolitano BRT (SMB)⁷, notadamente a aquisição do segundo lote de 200 ônibus novos⁸ para a Nova Frota, bem como a realização de investimentos na implantação, adequações ou melhorias de quatro garagens necessárias à operação do SMB, incluindo equipamentos destinados à manutenção e carregamento dos veículos elétricos.

Nota-se, portanto, que o Governo de Goiás, via CDTC, tem atuado como articulador de um processo ambicioso de renovação de 100% dos ônibus do SIT-RMTC até 2026, o que, para além do propósito de melhorar a qualidade e o conforto do serviço de transporte coletivo para os seus usuários, visa também à descarbonização do sistema por meio da introdução de uma frota de veículos com tecnologias de propulsão de baixas emissões, majoritariamente baseada em motores diesel Euro VI e, em parte, elétricos.

Apesar de tal iniciativa representar inequivocamente um grande avanço modernizador com potencial de tornar o sistema de transporte coletivo de Goiânia e região metropolitana em um modelo a ser seguido por outras cidades do Brasil, o processo de renovação completa de frota, como o que está ora em curso no SIT-RMTC, não está imune aos desafios de eficiência

³ Predominantemente veículos com motorização diesel Euro III (Blog RMTC Goiânia, 2013).

⁴ Para viabilizar a implementação do PAI foram firmados termos aditivos aos contratos de concessão dos serviços de transporte público coletivo do SIT-RMTC (4º Termo Aditivo), segundo os quais as concessionárias assumiram obrigações de realizar os investimentos compreendidos pelo projeto Nova RMTC (CDTC, 2024).

⁵ 122 ônibus convencionais Euro VI; 60 ônibus Super Padron, Euro VI, de 15 metros; 6 ônibus articulados, elétricos, de 23 metros; 6 ônibus Super Padron, elétricos, de 15 metros; e, 6 ônibus Padron, elétricos, de 12,7 metros.

⁶ A entrega de quase todos os veículos desse lote se deu no segundo semestre de 2024.

⁷ Integração operacional do BRT Leste-Oeste (Eixo Anhanguera) e BRT Norte-Sul (Eixo Norte-Sul).

⁸ Todos com ar-condicionado, sendo: 39 ônibus elétricos articulados, de 23 metros; 10 ônibus elétricos Super Padron, de 15 metros; e, 151 ônibus convencionais, Euro VI.

econômica e ambiental decorrentes das escolhas tecnológicas e operacionais feitas pelos atores envolvidos.

A opção, por exemplo, por ônibus elétricos, embora notoriamente uma das mais sustentáveis do ponto de vista ambiental, traz consigo implicações importantes em termos de custos operacionais e investimentos requeridos das empresas concessionárias para a instalação da infraestrutura de recarga das baterias desses veículos.

Preocupada com a falta de clareza e de conhecimento completo acerca desses aspectos, ainda não totalmente conhecidos no Brasil, a Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP) elaborou, em 2023, um instrumento de referência nacional para apoiar a parametrização de custos do ônibus elétrico baseada em dados realistas produzidos e atualizados por operadores e gestores, à medida que esses veículos vão sendo testados e incorporados aos sistemas de transporte público (Associação Nacional de Transportes Públicos, 2023). O SIT-RMTC, certamente, está produzindo e avaliando seus próprios dados por conta da utilização experimental de pouco mais de uma dezena desses veículos, em diferentes configurações, na operação de seus corredores de BRT (Governo de Goiás - SGG, 2024; Governo de Goiás, 2024b).

Por outro lado, a tecnologia de propulsão a diesel Euro VI, ainda que tenha custos conhecidos e não represente nenhuma alteração drástica no *status quo* operacional dos sistemas de transporte coletivo brasileiros, apresenta limitações em relação ao seu impacto ambiental quando o objetivo é a descarbonização de frotas. A despeito de sua importante contribuição para a redução de emissões de materiais particulados (MP) e óxidos de nitrogênio (NO_x), os ônibus Euro VI equipados com ar-condicionado, mesmo quando abastecidos com diesel B15⁹, não apresentam desempenho significativamente muito melhor em termos de emissões de CO₂ fóssil, quando comparados aos seus congêneres Euro III e Euro V, segundo estudo acerca da descarbonização da frota do transporte coletivo da cidade de São Paulo (Dallmann, 2019).

O estudo mencionado concluiu que, considerando as metas de redução de emissões de CO₂ fóssil definidas na Lei 16.802/2018 (São Paulo, 2018) para a frota de transporte coletivo urbano do município de São Paulo, as cinco combinações de tecnologias de propulsão/combustíveis que teriam emissão zero desse gás de efeito estufa seriam as seguintes: i) ônibus elétricos a bateria; ii) ônibus Euro VI a biodiesel B100; iii) ônibus Euro VI a diesel renovável (diesel verde); iv) ônibus Euro VI a etanol; v) ônibus Euro VI a biometano¹⁰ (Dallmann, 2019).

Os exemplos supracitados mostram que todas as tecnologias de propulsão veicular apresentam vantagens e desvantagens técnicas, econômicas e ambientais que, em processos amplos de renovação e descarbonização de frotas do transporte público, precisam ser comparadas e avaliadas com base em estudos informados por dados atualizados.

⁹ Mistura de biodiesel ao diesel fóssil na proporção de 15% que será atingida somente em 1º de março 2025. Em 2024, a proporção estabelecida pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) para o diesel comercializado no Brasil é de 14% (Agência Gov, 2024).

¹⁰ Biometano é um gás renovável obtido a partir do biogás, que por sua vez é gerado pela decomposição de matéria orgânica em condições anaeróbicas. O biometano é produzido por meio de processos de purificação e enriquecimento do biogás, removendo componentes como dióxido de carbono (CO₂) e sulfeto de hidrogênio (H₂S) para atingir características semelhantes às do gás natural, sendo utilizado como combustível veicular, insumo energético ou em aplicações industriais.

O presente relatório, primeiro de uma série de três, é parte de um estudo que visa oferecer aos atores do SIT-RMTC tais análises ao examinar, particularmente, a viabilidade da substituição dos atuais ônibus a diesel do sistema por ônibus a gás natural e/ou biometano como alternativa complementar às tecnologias de propulsão contempladas atualmente no âmbito do projeto Nova Frota.

Embora pareça uma novidade considerar veículos a gás natural para fins da renovação de frota prevista no Nova Frota, cabe lembrar que em 2007 o edital de concorrência para a concessão dos serviços do SIT-RMTC prestados até os dias atuais pelas cinco empresas concessionárias do sistema já previa, em um de seus anexos, a possibilidade de utilização de ônibus convencionais, articulados, biarticulados e micro-ônibus a GNV (CMTC, 2007). Trata-se, portanto, de uma tecnologia que evoluiu desde então e que hoje pode ser considerada madura, dado que já é uma opção ofertada por fabricantes como Scania e Iveco, os quais, além do GNV, admitem e promovem a possibilidade de utilização do biometano como combustível a ser combinado com gás natural nos motores que comercializam.

Desse modo, o estudo que ora se apresenta à Secretaria Geral de Governo (SGG) do estado de Goiás¹¹, tem por objetivo elaborar um *business case* detalhado para a substituição de ônibus a diesel da frota atual do SIT-RMTC por ônibus a gás natural e/ou biometano, avaliando aspectos econômicos, ambientais e operacionais dessa tecnologia¹². O referencial de comparação de viabilidade será o ônibus Euro VI, uma vez que este é o padrão tecnológico escolhido pelas empresas concessionárias para a renovação da maior parte da frota atual existente no referido sistema¹³. O escopo das análises previstas ao longo dos três relatórios a serem produzidos pelo estudo abrangem os seguintes itens:

- custos de combustíveis (gás natural, biometano e diesel);
- comparação econômica entre ônibus a gás/biometano e ônibus diesel padrão Euro VI;
- avaliação comparativa de custos de investimento, operação e manutenção (O&M) para ônibus a diesel, gás natural e biometano;
- cálculo do custo total de propriedade (TCO);
- mitigação de emissões de GEE e outros poluentes (NOx, MP);
- riscos de implementação;
- impactos socioeconômicos;
- potenciais benefícios para a transição energética de Goiás.

As análises do escopo acima descrito se aplicam a dois contextos distintos: i) o SIT-RMTC de Goiânia, em pleno processo de renovação de frota; ii) Luziânia (GO) e seu futuro BRT Entorno Sul, obra prevista no Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), mas que ainda se encontra em fase de estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental. A inclusão deste município

¹¹ Representada pela Subsecretaria de Políticas para Cidades e Transporte e pela Subsecretaria de Energia, Telecomunicações e Cidades Inteligentes que, em conjunto, demandaram a realização do estudo.

¹² A opção *dual fuel*, tecnologia de propulsão baseada na combustão de uma mistura de diesel e gás, também é considerada no *business case*.

¹³ Esse também é o padrão nacional segundo o Programa de Controle do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE).

goiano tem finalidade prospectiva, uma vez que o referido sistema de BRT se insere no Entorno do Distrito Federal, região do estado de Goiás formada por municípios com características de cidades dormitórios em que os fluxos de deslocamentos de seus habitantes são altamente influenciados e dependentes do Distrito Federal (DF).

Por serem unidades federativas distintas, a região do Entorno conecta-se ao DF por meio de serviços de transporte coletivo rodoviário interestadual semiurbano, regulados pelo governo federal, via Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Tais serviços compartilham o espaço viário e os equipamentos de apoio (terminais e abrigos de passageiros) providos pelo sistema de transporte coletivo do DF, mas sem uma integração planejada e coordenada (LABTRANS, 2024a). A futura implantação do BRT Entorno Sul pode ensejar, talvez, a criação de um Consórcio Interfederativo entre o Estado de Goiás, o DF e a União, inspirado no modelo de governança do SIT-RMTC, conforme proposição formalmente apresentada por representantes do governo de Goiás aos formuladores do Plano Diretor de Transportes Urbanos (PDTU) e do Plano de Mobilidade Urbana Sustentável (PMUS) do DF (LABTRANS, 2024b).

Diante do exposto, para além desta seção introdutória, o presente relatório está organizado e estruturado da seguinte forma. A seção 2 aborda a temática da mobilidade sustentável e suas possíveis trajetórias. Na seção 3, tem-se a descrição da metodologia adotada para as análises realizadas. Em seguida, a seção 4 desenvolve o *business case* dos ônibus a GNV e biometano, enquanto a seção 5 apresenta os resultados encontrados para diferentes tipos de ônibus e cenários de frotas. Por fim, a seção 6 tece as considerações finais do relatório, indicando as conclusões do estudo, recomendações para a tomada de decisão e os próximos passos.

2. Mobilidade sustentável e suas possíveis trajetórias

2.1 Perspectivas sobre a mobilidade urbana e transporte público

A mobilidade urbana pode ser entendida como as condições e instrumentos oferecidos pelas cidades para viabilizar e facilitar o deslocamento de cidadãos, bens e serviços, promovendo, assim, as relações sociais, econômicas e outras demandas da população (WRI, 2018). Nesse contexto, a mobilidade urbana figura como um dos temas centrais das agendas públicas, diretamente ligada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Organización de las Naciones Unidas, 2018).

Em face desse cenário contemporâneo, observa-se um momento único de reflexão e prospecção de alternativas para aperfeiçoar a lógica e a operação da mobilidade urbana. Esse movimento, no entanto, não se restringe a uma cidade específica, mas manifesta-se em escala global, com foco nas grandes metrópoles e capitais globais. Nos últimos dez anos, esse processo de reflexão foi intensificado pela busca por uma mobilidade mais eficiente e de menor impacto ambiental.

O transporte coletivo, em especial o ônibus urbano, desempenha um papel central nessa transformação, sendo o único modal ofertado por força de lei e regulado com participação da esfera pública. Em resposta às demandas de maior integração, qualidade do serviço, acessibilidade e inteligência operacional, o transporte coletivo busca se reposicionar. Nesse sentido, verifica-se uma crescente adoção de tecnologias voltadas à mobilidade de baixo carbono (BloombergNEF, 2020; International Energy Agency, 2022).

A mobilidade de baixo carbono no transporte público urbano refere-se ao conjunto de soluções tecnológicas e operacionais voltadas para a redução das emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes associados ao setor de transporte. Essas soluções incluem a adoção de veículos movidos por fontes de energia alternativas, como eletricidade, biocombustíveis líquidos e biometano, por exemplo, que reduzem tanto as emissões de particulados quanto a poluição atmosférica em áreas urbanas (Barassa et al., 2022).

No que tange aos veículos elétricos, como ônibus e trólebus, a propulsão é realizada por motores elétricos alimentados por baterias, eliminando as emissões diretas durante a operação. A eletricidade utilizada pode ser proveniente de fontes renováveis, como energia solar ou eólica, maximizando os benefícios ambientais desse modal. Ademais, os avanços em baterias e sistemas de recarga inteligente contribuem para a eficiência energética e maior autonomia desses veículos.

A mobilidade de baixo carbono também abrange o uso de biocombustíveis, como biodiesel e biometano, fontes renováveis derivadas de biomassa. Esses combustíveis têm o potencial de reduzir significativamente as emissões de CO₂ e outros poluentes em comparação aos combustíveis fósseis tradicionais, contribuindo para a diminuição da poluição atmosférica.

O sucesso da mobilidade de baixo carbono depende de um ecossistema integrado, composto por atores públicos e privados engajados, infraestruturas de suporte a operação e políticas públicas que incentivem o uso dessas tecnologias. Mobilidade elétrica e biocombustíveis, portanto, são soluções complementares, oferecendo uma gama de opções para as cidades que buscam uma transição para um transporte mais sustentável. Esse esforço visa não apenas

mitigar os impactos ambientais, mas também melhorar a qualidade de vida nas cidades ao reduzir a poluição e contribuir para o cumprimento de metas internacionais de descarbonização.

Além dos benefícios ambientais, a mobilidade de baixo carbono no transporte público também representa uma oportunidade para a sofisticação da qualidade dos serviços oferecidos. A redução das emissões de poluentes e o menor nível de ruídos operacionais influenciam diretamente na experiência dos passageiros e na qualidade do ambiente urbano. No caso dos ônibus elétricos, a operação silenciosa proporciona uma viagem mais tranquila, além de contribuir para a redução da poluição sonora nas cidades.

De forma semelhante, veículos movidos a biometano, que utilizam motores de combustão interna no ciclo Otto, apresentam operação mais gentil e menos ruidosa em comparação aos motores movidos a Diesel. A utilização de biometano não apenas representa uma fonte de energia renovável, mas também melhora a qualidade do serviço, ao reduzir tanto o impacto ambiental quanto a exposição da população aos ruídos.

2.2 Rotas tecnológicas possíveis para o transporte público de baixo carbono

Entre as arquiteturas tecnológicas disponíveis para o transporte de baixo carbono, pode-se classificá-las em algumas categorias principais, de acordo com o tipo de combustível utilizado e o sistema de tração. A base para essa caracterização vem dos trabalhos de Denton (2018), Barassa (2019;2022), D'Agosto et al. (2022), Bermudez (2018) e Chan (2007), que discutem detalhadamente as variações tecnológicas e suas implicações para a redução de emissões e eficiência energética. As categorias possíveis são

1. **Ônibus com combustíveis fósseis de menor emissão:** São veículos equipados com motores de combustão interna ciclo Diesel, que atendem aos padrões de emissão Euro VI. Esta tecnologia reduz significativamente a emissão de poluentes como óxidos de nitrogênio (NOx) e material particulado (MP), utilizando sistemas avançados de pós-tratamento dos gases de escape, como filtros de partículas e catalisadores seletivos (SCR). Além disso, essa categoria pode incluir a mistura de biodiesel ao diesel, o que ajuda a reduzir a pegada de carbono sem necessidade de modificações radicais no motor.
2. **Ônibus movidos com biocombustíveis 100% renováveis:** Esses veículos derivam da categoria anterior ao utilizar os mesmos motores de combustão interna, porém, neste caso, são alimentados exclusivamente por biocombustíveis 100% renováveis, como HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) –, conhecido como diesel verde, que é produzido a partir de óleos vegetais ou gorduras animais, através de processos que resultam em menor emissão de CO₂. Esses combustíveis são neutros em carbono, pois a quantidade de CO₂ emitida durante sua queima é compensada pela absorção de carbono durante o ciclo de vida para produzi-los.
3. **Ônibus a gás no ciclo Otto:** Os ônibus movidos a gás natural veicular (GNV) ou biometano utilizam motores ciclo Otto, os mesmos princípios dos motores de ignição por faísca usados em carros a gasolina. A diferença entre GNV e biometano está na origem do combustível: enquanto o GNV é um combustível fóssil, o biometano é

produzido a partir de fontes renováveis, como resíduos orgânicos. O biometano reduz consideravelmente as emissões de gases de efeito estufa (GEE) quando comparado ao diesel, tornando-se uma alternativa sustentável e de baixo custo para a mobilidade urbana.

4. **Ônibus Híbridos (Combustível Líquido + Gás Veicular):** A pesquisa de D'Agosto et al. (2022) explora a implementação de ônibus com sistema *dual-fuel* diesel-gás no transporte coletivo urbano, propondo uma análise detalhada de cenários de penetração dessa tecnologia no Rio de Janeiro (D'Agosto et al., 2022). Nesse sentido, o sistema *dual-fuel* diesel-gás natural é uma tecnologia que permite a operação de motores a diesel utilizando uma combinação de diesel e gás natural, ao invés de depender exclusivamente de um único combustível. Nessa configuração, o motor mantém sua estrutura base de funcionamento a diesel, mas é adaptado para injetar gás natural junto com o diesel durante o processo de combustão. O funcionamento do sistema *dual-fuel* ocorre de maneira integrada: o diesel é utilizado para iniciar a combustão no cilindro (atuando como "ignitor"), e o gás natural, injetado logo após, participa da combustão, contribuindo com uma parcela significativa da energia liberada.
5. **Ônibus híbridos (Combustível Líquido + Eletricidade):** Esses veículos combinam um motor de combustão interna com um motor elétrico. O sistema híbrido permite que o ônibus opere com o motor elétrico em baixas velocidades e o motor a combustão em velocidades mais altas ou para recarregar as baterias. Existem diferentes configurações de sistemas híbridos:
 - **Híbrido paralelo:** Ambos os motores (combustão e elétrico) podem trabalhar simultaneamente para fornecer tração veicular.
 - **Híbrido em série:** O motor a combustão é usado apenas para gerar eletricidade que alimenta o motor elétrico, que é o único responsável pela propulsão.
 - **Série-paralelo:** Combina elementos dos dois anteriores, permitindo mais flexibilidade entre os modos de operação, porém, com mais complexidade de funcionamento.
 - **Híbridos plug-in:** Permitem o carregamento das baterias diretamente de uma fonte externa, além de utilizar o motor a combustão para recarga quando necessário.
6. **Ônibus elétricos:** Esses veículos são totalmente movidos por baterias recarregáveis que alimentam o motor elétrico. Conhecidos como ônibus elétricos puros, eles não emitem poluentes na sua operação, proporcionando uma solução de mobilidade com zero emissões locais do “tanque a roda” (isto é, não se levando em conta o ciclo de vida total de emissões, conhecido como “berço ao túmulo”)¹⁴. A autonomia dos ônibus elétricos depende da capacidade da bateria, que pode ser recarregada por meio de infraestrutura de carregamento rápido (em corrente contínua). Além disso, os trólebus, que utilizam catenárias conectadas à rede elétrica aérea para operar em rotas específicas,

¹⁴ A diferenciação entre a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) "tanque à roda" (*tank-to-wheel*) e "berço ao túmulo" (*cradle-to-grave*) está na abrangência das fases consideradas. A ACV "tanque à roda" restringe-se à fase de uso de um veículo, avaliando a eficiência energética e as emissões geradas durante a operação. Em contraste, a ACV "berço ao túmulo" adota uma abordagem mais abrangente, considerando todas as etapas do ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas até o descarte ou reciclagem, proporcionando uma análise mais completa dos impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida.

apresentam uma alternativa que elimina a necessidade de baterias, contribuindo para a redução de emissões locais. No entanto, essa tecnologia está em declínio na América Latina e no Brasil devido aos elevados custos de infraestrutura necessários para a instalação e manutenção das catenárias, além da limitação de rotas, que exige a construção de uma rede dedicada. Outro fator que contribui para o desuso dos trólebus é a poluição visual gerada pelas estruturas aéreas, que impacta negativamente o ambiente urbano.

7. **Ônibus elétricos com células a combustível de hidrogênio:** Esses ônibus utilizam hidrogênio como combustível para gerar eletricidade por meio de uma célula a combustível. Durante o processo, o hidrogênio reage com o oxigênio do ar, gerando eletricidade e emitindo apenas vapor d'água como subproduto. Embora extremamente eficientes e com emissões praticamente nulas, a tecnologia ainda enfrenta desafios relacionados ao custo elevado de produção e à necessidade de infraestrutura especializada de abastecimento de hidrogênio, o que limita sua implementação em larga escala.

2.3 A descarbonização do transporte coletivo pesado mundo afora: tendências e alternativas

A descarbonização do transporte coletivo pesado, particularmente ônibus, tem sido um foco central nos esforços globais para mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Esse movimento é marcado por uma diversidade de abordagens tecnológicas e políticas, refletindo tanto as condições locais quanto as dinâmicas geopolíticas da cadeia automotiva global. Esta seção explora exemplos gerais de como diferentes regiões do mundo estão promovendo a descarbonização desse setor, destacando o protagonismo da eletrificação, bem como alternativas como o uso do gás natural veicular (GNV) e do biometano.

Primeiramente, a eletrificação dos ônibus surge como a principal tendência global, com destaque para os países asiáticos, liderados pela China. A adoção em larga escala de ônibus elétricos se justifica por seu potencial de redução direta das emissões locais e por oferecer uma tecnologia madura e disponível no mercado. Em 2023, cerca de 50.000 ônibus elétricos foram vendidos globalmente, representando aproximadamente 3% das vendas totais de veículos pesados. Países como Bélgica, Noruega, Suíça e a própria China alcançaram mais de 50% das vendas de ônibus elétricos em 2023, enquanto outros mercados, como Canadá, Chile, Finlândia, Holanda, Polônia, Portugal e Suécia, registraram mais de 20% (IEA,2024).

A China, em particular, consolida-se como líder global na produção do setor. Apesar de uma queda nas vendas internas – de 90% das vendas globais em 2020 para 60% em 2023 –, o país manteve uma posição de destaque nas exportações. Hoje, os ônibus elétricos chineses representam 85% do mercado na América Latina e 30% da frota na União Europeia. Essa liderança não é apenas técnica, mas geopolítica, refletindo os investimentos estratégicos da China em veículos elétricos a bateria (VEB) ao longo da última década (IEA,2024).

Na América Latina, cidades como Bogotá e Santiago do Chile têm avançado significativamente na eletrificação de suas frotas, implementando, juntas, cerca de 4.000 ônibus elétricos (EBUS RADAR, 2024). Outras capitais, como São Paulo e Montevidéu, também estão experimentando projetos-piloto que contribuem para consolidar a mobilidade elétrica na região. Esses exemplos ilustram o potencial de mercados emergentes para acelerar a transição energética, ainda que enfrentem desafios estruturais, como custos iniciais elevados e necessidade de infraestrutura de recarga.

Embora a eletrificação lidere a discussão global, não se trata de uma solução universal. Regiões com restrições de infraestrutura ou particularidades climáticas e econômicas têm explorado alternativas, como o gás natural veicular (GNV) e o biometano. O GNV, por apresentar emissões inferiores ao diesel, tem sido utilizado como um combustível de transição em várias cidades. Contudo, sua principal limitação é o fato de ainda ser um combustível fóssil.

O biometano, por sua vez, emerge como uma alternativa mais sustentável e promissora. Produzido a partir de fontes renováveis, como resíduos urbanos, esgotos e vinhaça de cana de açúcar, ele tem sido amplamente adotado na Europa. Em Portugal, a Sociedade de Transportes Colectivos do Porto (STCP) incorporou 11,5% de biometano no abastecimento de sua frota de 333 ônibus movidos a GNV. A frota da STCP é composta por 434 veículos, sendo 77% movidos a gás natural (destes 11,5% a biometano) (STCP, 2023).

Na Suécia, o GNV/biometano tem um papel central no transporte público urbano há décadas. O país foi pioneiro na conversão de sua frota de ônibus urbanos para biometano, derivado principalmente do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto e resíduos orgânicos. Cidades como Estocolmo e Malmö lideram o uso dessa tecnologia, integrando biometano em suas políticas de mobilidade sustentável. A implementação dessa alternativa sustentável é fruto de um esforço conjunto entre o governo, empresas de transporte público e indústrias de biotecnologia, que têm investido continuamente na ampliação da infraestrutura de produção e distribuição de biometano (AGRIMIDIA, 2018).

Assim, a escolha de tecnologias para descarbonizar o transporte coletivo pesado não se restringe a critérios técnicos, mas envolve interesses nacionais, geopolíticos e estratégicos. A eletrificação, embora amplamente defendida, favorece países com domínio sobre a cadeia de suprimentos de baterias, como a China. Em contrapartida, o uso do biometano demonstra que alternativas podem ser mais adequadas a contextos locais específicos, especialmente em países com elevado potencial para produção de biogás, como o Brasil.

Reforça-se ainda, que não há uma solução universal para a descarbonização do transporte coletivo pesado. Cada cidade deve realizar análises detalhadas de viabilidade técnica e econômica para identificar as alternativas mais adequadas às suas realidades. No caso do SIT-RMTC, essa abordagem será fundamental para determinar o caminho mais eficiente e sustentável, foco do presente projeto.

2.4 Recomendações para a tomada de decisão

Embora as novas alternativas tecnológicas sejam essenciais para promover a descarbonização do transporte público urbano, elas não podem ser vistas como soluções isoladas. É imprescindível que essas tecnologias sejam integradas a um planejamento abrangente, que considere as especificidades locais, os desafios de infraestrutura e as particularidades econômicas e sociais de cada região.

O sucesso de uma mobilidade urbana sustentável depende de uma abordagem holística, que envolva a articulação entre diferentes atores — governos, empresas privadas, academia e sociedade civil — e um conjunto de políticas públicas que incentivem a transição para modais de transporte mais limpos e eficientes. Além disso, é necessário garantir a infraestrutura adequada e modelos de negócios que assegurem a sustentabilidade financeira dessas inovações.

Por fim, a diversidade de soluções tecnológicas, como eletrificação, biocombustíveis e biometano, evidencia que a transição para um transporte coletivo de baixo carbono não se limita à adoção de uma única rota tecnológica. Ao contrário, requer uma combinação estratégica de tecnologias complementares, aliada a um planejamento integrado, para maximizar os benefícios ambientais, econômicos e sociais.

3. Metodologia

O Custo Total de Propriedade (TCO) para frotas de ônibus municipais de passageiros é uma metodologia abrangente que visa quantificar todos os custos associados à aquisição, operação e manutenção dos veículos ao longo de sua vida útil. Esta abordagem considera não apenas o preço inicial de compra dos ônibus, mas também todos os gastos subsequentes necessários para os manter em operação, incluindo combustível, manutenção, seguros, impostos, treinamento de pessoal e eventual descarte ou revenda¹⁵.

Os principais componentes do TCO para frotas de ônibus municipais incluem: custos de aquisição (preço de compra, taxas e impostos iniciais); custos operacionais (combustível, salários de motoristas e equipe de apoio, seguros, licenciamentos); custos de manutenção (preventiva e corretiva, peças de reposição, mão de obra especializada); custos de infraestrutura (garagens, equipamentos de manutenção, sistemas de recarga para veículos elétricos); custos financeiros (juros de financiamentos, depreciação); e custos indiretos (treinamento, gestão da frota, sistemas de monitoramento).

A importância do TCO para a gestão adequada da frota reside em sua capacidade de proporcionar uma visão holística e de longo prazo dos custos associados à operação. Isso permite aos gestores tomar decisões mais informadas sobre aquisições, substituições e estratégias operacionais. O TCO auxilia na identificação de oportunidades de redução de custos, na comparação entre diferentes tecnologias e modelos de veículos, e na otimização do ciclo de vida da frota.

A metodologia de cálculo do TCO envolve, primeiramente, a definição do período de análise, geralmente correspondente à vida útil esperada dos veículos. Em seguida, todos os custos previstos são estimados e projetados ao longo desse período. Esses valores são então trazidos a valor presente utilizando uma taxa de desconto apropriada, permitindo a comparação direta entre diferentes opções. O TCO total é calculado somando-se todos esses custos descontados, e pode ser expresso como um valor total ou anualizado.

Diversos fatores podem impactar significativamente o TCO de uma frota de ônibus municipais. Entre eles, destacam-se: a eficiência energética dos veículos; os preços e a disponibilidade de combustíveis; os custos e a frequência de manutenção; as políticas de incentivos governamentais; as condições de operação (topografia, clima, quilometragem anual); e a evolução tecnológica do setor.

Para validar novas alternativas tecnológicas, como ônibus a biometano e gás natural, o TCO é uma ferramenta essencial. Ele permite comparar de forma objetiva os custos totais dessas novas tecnologias com as opções convencionais, como ônibus a diesel. No caso específico do biometano, o cálculo do TCO deve considerar não apenas os custos diretos do veículo, mas também os investimentos necessários em infraestrutura de abastecimento, possíveis incentivos governamentais para tecnologias limpas, e os potenciais benefícios econômicos derivados da redução de emissões e do uso de um combustível renovável.

¹⁵ A metodologia do TCO vem sendo desenvolvida há mais de 30 anos (Ellram, 1995) e amplamente utilizada por diversos organismos internacionais e análises no setor de transporte (Basma et al., 2021; Mansoor J. A. Khan and Nuri Cihat Onat, 2022; Topal and Nakir, 2018).

Além disso, ao avaliar alternativas como o biometano, é crucial incorporar na análise do TCO fatores como a disponibilidade local do combustível, a estabilidade de seu fornecimento a longo prazo, e os custos potenciais de adaptação da frota e treinamento de pessoal. Uma análise de sensibilidade também deve ser realizada para entender como variações nos preços dos combustíveis, custos de manutenção e outros fatores críticos podem afetar o TCO ao longo do tempo.

Em suma, o TCO é uma ferramenta importante para a avaliação de alternativas tecnológicas para frotas de ônibus, proporcionando uma base sólida para decisões estratégicas e operacionais, e permitindo uma avaliação abrangente e objetiva de novas tecnologias como o biometano.

No presente estudo, o TCO será calculado anualizando (TCOa) os custos ao longo da vida útil para o valor presente e depois sendo nivelado pela distância total percorrida. Assim, o TCO nivelado (TCON) será o resultado da divisão do TCOa pela distância percorrida por ano, com uma unidade de R\$/km, de forma a facilitar a comparação das alternativas¹⁶. A equação a seguir expressa esses cálculos:

$$\text{TCOa} = (\text{CA} * r * (1 + r)^n / (1 + r)^n - 1) + \sum (\text{CO\&Mt} + \text{CComb}) - (\text{VR} * r * (1 + r)^n / (1 + r)^n - 1)$$

Onde:

TCOa = Custo Total de Propriedade Anualizado

CA (R\$) = Custo de Aquisição = Preço de compra do veículo + Custos de implementação + Taxas e impostos iniciais

n = Número de anos da vida útil esperada do ativo

CO&M (R\$/ano) = Custos anuais de O&M = Custos de manutenção preventiva + Custos de manutenção corretiva + Custos de mão de obra + Custos de peças e materiais + Custos de seguros + Custos de licenciamento + Custos indiretos (treinamento, gestão da frota, etc.)

CComb (R\$/ano) = Custos Anuais de Combustível = Consumo médio de combustível (L ou m³/km) * Quilometragem anual * Preço do combustível

VR = Valor Residual = Valor estimado de revenda do veículo ao final de sua vida útil

r = Taxa de desconto anual

Logo,

$$\text{TCON} = \text{TCOn} / \text{DTKa}$$

Onde:

DTKa = Distância total em quilômetros por ano.

¹⁶ A metodologia aqui utilizada é adaptada de referências amplamente utilizadas.

Dessa forma, a variável principal de análise será a comparação do TCO para as diferentes alternativas tecnológicas.

Uma outra variável de saída de relevante importância neste contexto são as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas a cada alternativa tecnológica. Esta consideração é fundamental para uma avaliação holística que alinha os objetivos econômicos com as metas de sustentabilidade e redução de impacto ambiental das cidades.

Para quantificar as emissões totais de GEE de cada alternativa, é necessário calcular os consumos de combustível e aplicar os fatores de emissão específicos para cada rota tecnológica. Este cálculo permite uma comparação direta entre diferentes opções de propulsão, como diesel convencional, biodiesel, gás natural, biometano e eletricidade. A equação para este cálculo pode ser expressa da seguinte forma:

$$ETa = \sum (Ci * FEi * D) / 1.000.000$$

Onde:

ET = Emissões Totais Anuais de GEE (em toneladas de CO₂ equivalente)

Ci = Consumo específico do combustível i (em L/km ou m³/km)

FEi = Fator de Emissão do combustível i (em gCO₂e/L ou gCO₂e/kWh)

DTKa = Distância anual total percorrida (em km)

i = Tipo de combustível ou fonte de energia

É crucial destacar que os fatores de emissão utilizados nesta análise devem ser aqueles denominados “do poço à roda” (*well-to-wheel*), que consideram toda a cadeia de valor do combustível, desde sua produção até o consumo final no veículo. Esta abordagem proporciona uma visão mais completa e realista do impacto ambiental de cada alternativa, indo além das emissões diretas da combustão e incluindo as emissões associadas à extração, processamento e distribuição dos combustíveis.

A incorporação desta equação na análise do TCO permite aos gestores de frotas e formuladores de políticas públicas tomarem decisões mais informadas, equilibrando custos financeiros com impactos ambientais. Isso é particularmente relevante no contexto atual, onde muitas cidades estão estabelecendo metas ambiciosas de redução de emissões e buscando alternativas mais limpas para o transporte público. Além disso, esta abordagem possibilita a monetização das emissões de GEE, seja através da aplicação de taxas de carbono ou da valoração de créditos de carbono, integrando assim os custos ambientais diretamente na análise econômica do TCO.

4. O Business Case dos ônibus a gás natural veicular (GNV) e biometano

Esta seção tem como objetivo descrever os casos analisados para a substituição tecnológica de ônibus no SIT-RMTC (Goiânia e região metropolitana) e Luziânia (Entorno do DF). Considerando as rotas tecnológicas discutidas anteriormente e entendendo que as opções elétricas já foram ou estão sendo analisadas pelo governo de Goiás, empresas concessionárias e CDTC, no âmbito do projeto Nova Frota, o foco aqui recai sobre alternativas que utilizam combustíveis gasosos em substituição ou complemento ao diesel.

Atendendo à demanda específica da Subsecretaria de Políticas para Cidades e Transporte e da Subsecretaria de Energia, Telecomunicações e Cidades Inteligentes, a análise aqui apresentada concentra-se na comparação da modernização da frota de ônibus diesel Euro VI com três alternativas: ônibus a GNV, ônibus GNV/biometano e ônibus *dual-fuel* (diesel/GNV ou biometano).

Esta comparação será realizada utilizando o Custo Total de Propriedade Nivelado (TCon) que, conforme mencionado na Seção 3, representa o custo total de propriedade anualizado dividido pela distância total percorrida por ano. O TCon permite uma comparação direta e objetiva entre as diferentes alternativas tecnológicas.

Além da análise econômica, serão avaliadas as emissões anuais totais de cada opção, proporcionando uma visão abrangente dos impactos ambientais associados a cada tecnologia. É importante ressaltar que, nesta fase inicial, a análise considerará especificamente um ônibus individual com base nas premissas listadas na Tabela 1. Os cenários de troca de frotas completas serão abordados na Seção 5.

Tabela 1 - Premissas utilizadas para as análises de simulação econômica

Taxa de desconto	%	14%
Vida útil	Anos	10
Rodagem	km/ano	72.000
Valor residual	%	5%
Custo de O&M	R\$/km	1,02
Sazonalidade biometano*	%	42%
Premissa dual**	%	20%
Consumo de diesel***	L/km	0,60
Consumo de GNV***	m ³ /km	0,635
Consumo de biometano	m ³ /km	0,65

Nota: *Tempo da entressafra e sem produção de biometano; ** Utiliza prioritariamente GNV e Biometano, porém 20% do tempo utiliza diesel, que substitui GNV e biometano na mesma proporção; *** Fonte: Dallmann (2019).

Fonte: Elaboração dos autores

Os investimentos para aquisição de ônibus considerados são os seguintes¹⁷:

- Ônibus a Diesel (Euro 6) – R\$ 900.000
- Ônibus a GNV/Biometano – R\$ 1.044.000
- Ônibus convertido dual – R\$ 990.000

As simulações e estimativas realizadas neste estudo consideraram diferentes preços de combustíveis. Para o óleo diesel, **foi considerado um preço de R\$/L 4,5**. Esse valor foi fornecido pelos operadores de ônibus atuais, correspondendo ao valor real das operações. Além disso, ainda foram realizadas verificações do valor fornecido. Primeiro, em consulta a base de dados de preços de combustíveis da ANP foram levantados os preços médios e mínimos de venda de diesel S10 e S500 em Goiânia, sendo respectivamente R\$/L 5,98 e R\$/L 5,85 para os preços médios e R\$/L 5,58 R\$/L 5,55. Devido a diferença, a consulta aos stakeholders revelou que as operações atuais são isentas de ICMS, que para o óleo diesel tem alíquota fixa de R\$/L 1,0635¹⁸. A partir desses valores, a verificação mostrou que o preço fornecido pelos operadores referem-se ao preço mínimo da base da ANP subtraídos a alíquota de ICMS.

Já para os preços de Gás Natural e Biometano foram feitas estimativas, uma vez que não há operações desses combustíveis para transporte no estado de Goiás. Para o **GNV foi considerado o valor de R\$/m³ 3,60**. Esse valor resultou do valor de referência de operações de gás natural industrial no estado da ordem de R\$/m³ 5,00, subtraída a alíquota de ICMS de R\$/m³ 1,4139 para equalizar o custo do diesel em ICMS. Para o **biometano foi considerado o preço de R\$/m³ 4,2**, já sem o ICMS. Esse valor foi estimado pelo projeto BEP (*Brazil Energy Programme*)¹⁹, na faixa superior. A escolha pela faixa superior das estimativas do estudo deve-se ao fato que não existem plantas de biometano em Goiás, baseadas em resíduos da produção de etanol, tampouco baseadas aterros que, em geral, têm custos mais baixos.

Assim, com estas referências de preços, busca-se refletir as condições de mercado futuro de GNV e biometano, bem como das operações de diesel, fundamentais para a comparação econômica entre as diferentes alternativas tecnológicas.

Outras premissas que foram utilizadas para as simulações e influenciam o consumo de combustível são:

- A sazonalidade do biometano advindo de plantas sucroenergéticas considerou uma safra de 7 meses e uma entressafra de 5 meses. Ou seja, o biometano supre 58% enquanto o GNV supre os restantes 42% do consumo de combustível;

¹⁷ Valores levantados com agentes de mercado.

¹⁸ De acordo com o convênio ICMS 172/2023.

¹⁹ <https://i17.eco.br/brazil-energy-programme/>

- Para o caso dos ônibus com tecnologia *dual-fuel*, algumas premissas foram consideradas:
 - Uso prioritário do biometano considerando a sazonalidade acima descrita;
 - Uso de diesel em 20% da operação por diversas condições;
 - Esse uso de diesel reduz de forma uniforme o consumo de GNV e Biometano;
 - A eficiência na queima desses combustíveis é cerca de 5% menor que as opções dedicadas.

Além dessas premissas econômicas, são considerados os fatores de emissões específicos por combustível, levando em conta a abordagem “do poço à roda” para uma avaliação mais completa do impacto ambiental de cada alternativa. A Tabela 2 apresenta esses valores.

Tabela 2 – Fatores de emissão “do poço à roda”

	Fatores de emissão	Conteúdo Energético	Fatores de emissão
	gCO ₂ /MJ	MJ/L ou m ³	gCO ₂ /L ou m ³
Diesel B	75,16	35,17	2.643,38
GNV	57,86	36,82	2.130,41
Biometano	12,70	36,67	465,71

Fonte : Elaboração dos autores com base em <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/renovacalc>, EPE (2022) e Freitas et al. (2025)

A partir dessas premissas e com a utilização do TCO como métrica principal é possível fazer uma comparação equitativa entre as diferentes tecnologias, levando em conta não apenas os custos iniciais de aquisição, mas também os custos operacionais e de manutenção ao longo da vida útil dos veículos. Já a inclusão da análise de emissões anuais totais complementa a avaliação econômica, permitindo uma compreensão mais holística dos benefícios e desafios associados a cada opção tecnológica.

Vale reiterar que as análises constantes deste relatório focam, inicialmente, a análise de um único ônibus, estabelecendo assim uma base sólida para futuras avaliações em escala de frota. Esta abordagem permite uma compreensão detalhada dos custos e benefícios associados a cada tecnologia antes de extrapolar para cenários mais complexos de substituição de frota completa.

4.1 O caso do ônibus articulado para operações de BRT

Além das análises para ônibus padron e super padron, também foram realizadas simulações de TCO para ônibus articulados, conforme metodologia apresentada. A ideia é simular casos de BRT que utilizam esse modelo de veículo, a exemplo do futuro BRT Entorno Sul a ser implantado em Luziânia. Para isso, foi utilizado como referência o veículo Scania modelo Articulado 6x2/2 – 18 – 20,5m, chassi Scania K 340 6x2*4 a gás e carroceria Caio Millenium. As premissas e dados de entrada utilizados para as simulações foram as seguintes:

- Investimento: R\$ 2.520.000
- Consumo referência: 1,14 km/m³²⁰
- Custos de O&M: 2,4x o valor do ônibus a biometano acima ou R\$ 2,57/km²¹

Vale destacar que o combustível principal neste caso é o biometano. O objetivo dessa análise é simular possíveis custos e volumes de consumo de combustível. Já a premissa de sazonalidade na produção de biometano permanece a mesma, ou seja, em 42% do tempo será utilizado gás natural por conta da entressafra de cana-de-açúcar.

4.2 Cenários para tamanho de frotas a serem substituídas

Alguns cenários de introdução de frotas com tecnologias alternativas serão avaliados de modo a fornecer subsídios sobre os valores totais de investimentos, custos de O&M e consumos de combustível. Foram definidos no escopo do projeto os tamanhos de frotas de 300, 450, 500 e 600 veículos. Contudo, aqui ainda foram adicionados dois cenários com quantitativos menores de 50 e 200 veículos, de forma a estimar projetos piloto.

²⁰ Fornecido pelo fabricante.

²¹ Os custos de O&M foram estimados tomando como base os do ônibus a biometano e aplicando a proporção do investimento do ônibus articulado e o ônibus de biometano.

5. Análises do custo total de propriedade e emissões

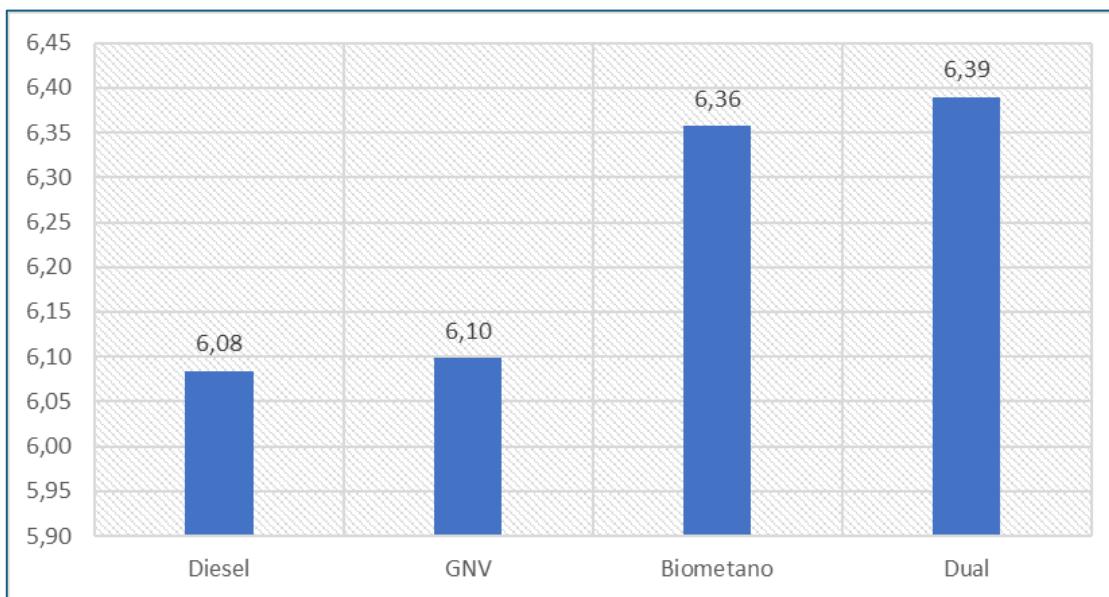
5.1 Análise do Custo Total de Propriedade Nivelado (TCOn)

Os resultados das simulações indicam variações interessantes no TCOn entre as diferentes alternativas tecnológicas:

- Ônibus a diesel Euro VI (caso base): O TCOn ficou em torno de R\$ 6,08/km.
- Ônibus a GNV: Mostrou-se como uma opção competitiva ao Diesel Euro VI, com um TCOn de R\$ 6,10/km, somente cerca de 0,3% mais alto que a alternativa à diesel.
- Ônibus a Biometano: Apresentou-se como uma alternativa um pouco mais custosa que o diesel, com um TCOn de R\$ 6,36/km, sendo cerca de 4,5% mais caro que a alternativa Diesel Euro VI. É importante notar que esta alternativa não utiliza exclusivamente biometano devido à sazonalidade e entressafra da produção considerada.
- Ônibus com tecnologia *dual-fuel*: Apresentou um TCOn mais alto, cerca de 5,2% mais caro que a alternativa diesel, com R\$ 6,39/km. Isso é consequência de uma menor eficiência do motor dual-fuel, que utiliza os três combustíveis (diesel, GNV e biometano).

Estes resultados sugerem que, economicamente, a alternativa a Diesel Euro VI e a alternativa a GNV são equivalentes e as alternativas a biometano ou dual-fuel apresentam uma margem muito próxima, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Custo total de propriedade (TCO – R\$/km) para as diferentes alternativas tecnológicas



Fonte: Elaboração dos autores

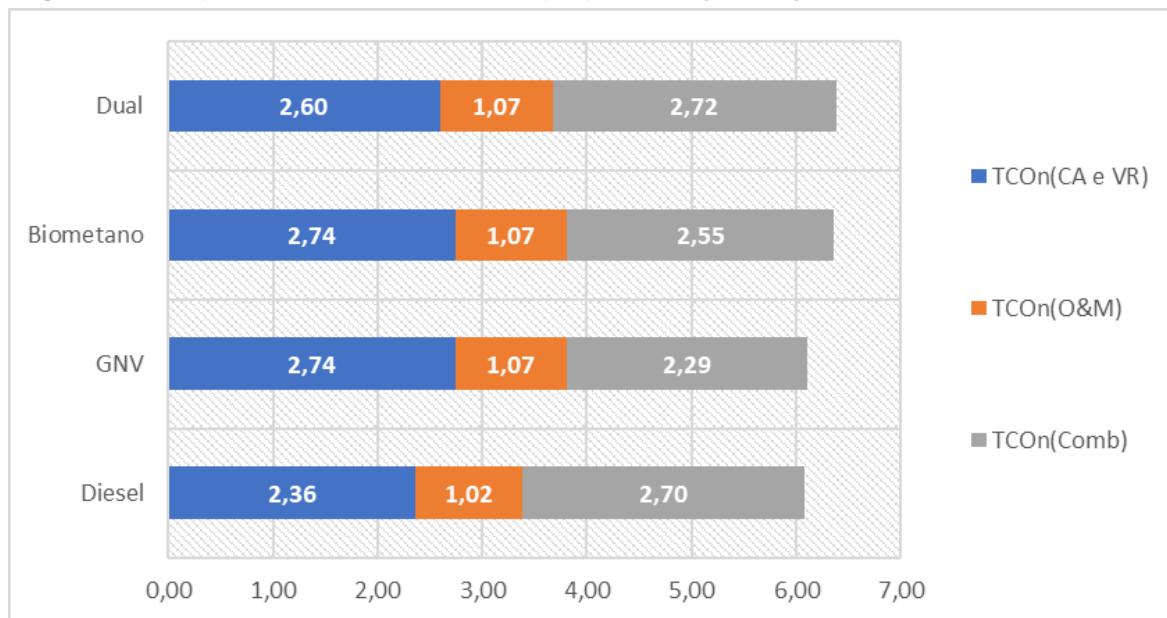
5.2 Composição do TCO

A análise da composição do TCO revela *insights* importantes sobre a estrutura de custos de cada alternativa:

- O custo do combustível é o componente mais significativo para as alternativas que utilizam diesel, Diesel Euro VI e Dual-fuel. Aqui vale destacar que os custos com combustíveis da alternativa a GNV e biometano são menores que o caso base do diesel²².
- O custo de aquisição dos veículos é o componente mais importante para as alternativas de GNV e Biometano, por conta dos maiores custos de investimentos nos veículos. Esse é o principal componente em termos de aumento entre as alternativas de GNV e Biometano e a alternativa Diesel Euro VI.

Esta distribuição de custos destaca a importância crucial dos custos de aquisição, dos preços dos combustíveis e das eficiências na viabilidade econômica de cada alternativa, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Componentes do Custo total de propriedade (R\$/km)



Fonte: Elaboração dos autores

²² Lembrando da premissa de isenção de ICMS no GNV e biometano, que possui alíquota mais alta que a do diesel.

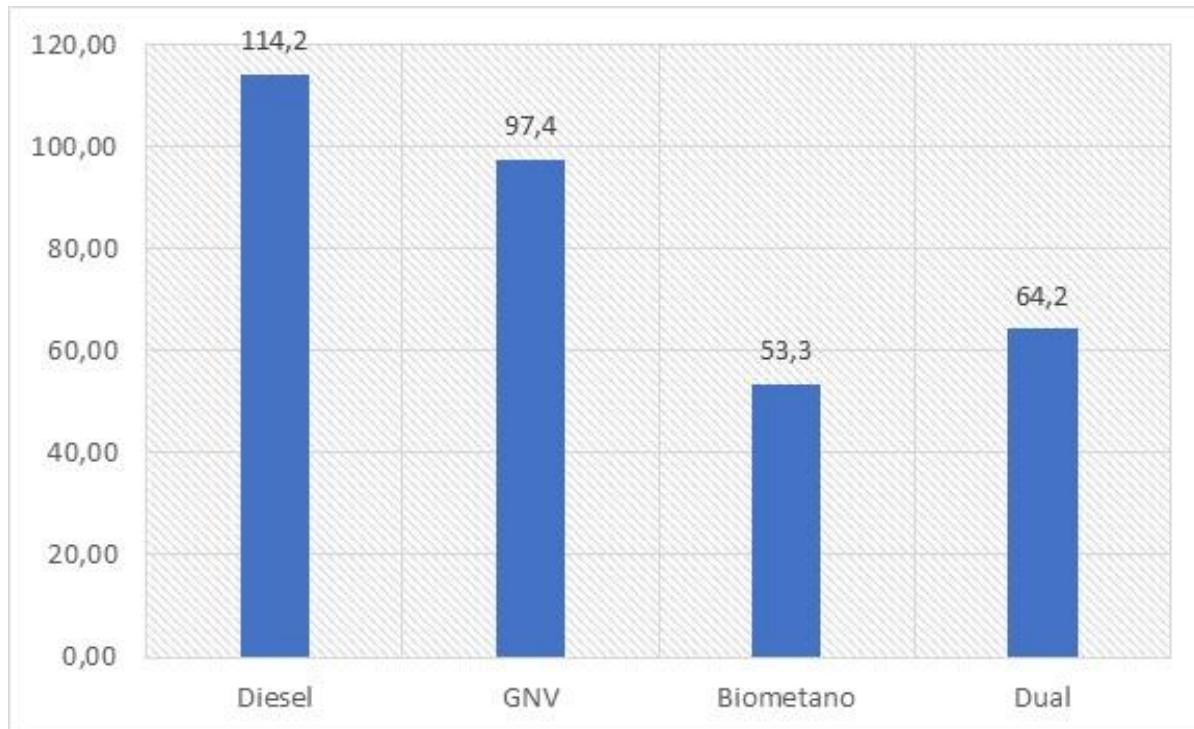
5.3 Análise de Emissões

As emissões de gases de efeito estufa, considerando os fatores do poço à roda, apresentam resultados que merecem atenção:

- Caso base (diesel Euro 6): Emissões na ordem de 114 tCO₂/ano.
- Caso GNV: Apresenta uma redução de emissões de aproximadamente 15% em relação ao diesel, cerca de 97,4tCO₂/ano.
- Caso biometano: Como esperado, apresenta as menores emissões, com uma redução de cerca de 35,5% em relação ao diesel, cerca de 73,5 tCO₂/ano. Esta redução não é ainda maior devido à necessidade de uso de gás natural para compensar a sazonalidade da produção de biometano.
- Caso ônibus dual: Apresenta emissões na ordem de 79,6 tCO₂/ano, posicionando-se entre o biometano puro e o diesel, devido ao uso misto de combustíveis.

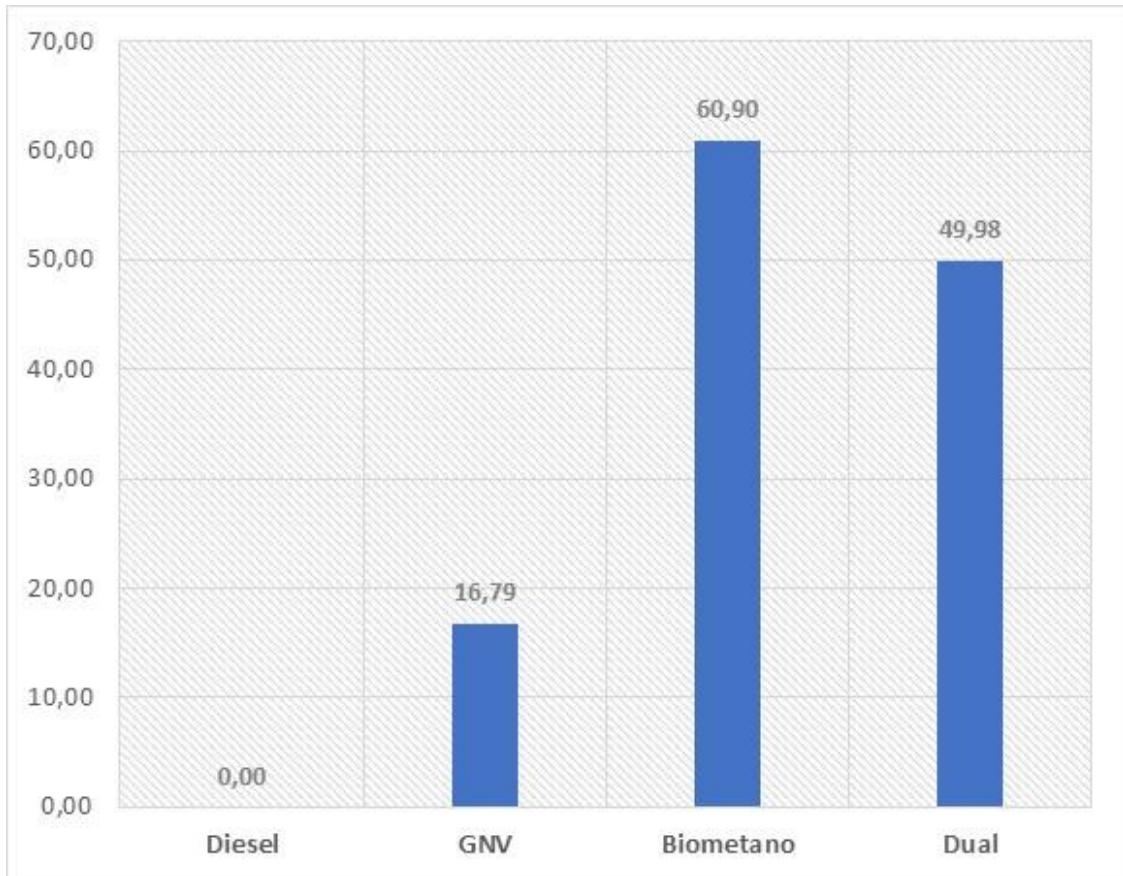
Estes resultados destacam que, do ponto de vista ambiental, o biometano se apresenta como a opção mais vantajosa, porém a alternativa a gás natural também apresenta uma mitigação de emissões relevante. As Figuras 3 e 4 ilustram esses pontos.

Figura 3 –Emissões totais de Gases de Efeito Estufa (GEE) – tCO₂/ano



Fonte: Elaboração dos autores

Figura 4 –Mitigação de emissões totais de Gases de Efeito Estufa (GEE) – tCO₂/ano



Fonte: Elaboração dos autores

As análises apresentadas nesta seção cobrem apenas as emissões de CO₂, uma vez que estas são as mais relevantes para os objetivos de descarbonização. A análise das emissões locais (CO, NO_x e número de partículas sólidas) encontra-se no Anexo I (Figura 15) e considera apenas o cenário de introdução para 50 ônibus para fins de referência comparativa.

5.4 O caso dos ônibus articulados a biometano

Como mencionado, a simulação para um modelo de ônibus articulado a biometano tem como objetivo informar quais seriam as ordens de grandezas dos custos para uma alternativa que inclua o BRT. Aqui, vale reiterar que esse caso representaria uma possível operação do BRT Entorno Sul, em Luziânia. No entanto, como ainda não há definições do sistema, essas simulações realizadas no estudo podem direcionar futuras especificações. Em suma, nessa hipótese, tem-se os seguintes resultados:

- Ônibus articulado a biometano tem o TCO estimado em R\$ 12,53/km.
- Essa alternativa apresenta o custo de aquisição como maior componente proporcional, cerca de 52% do TCO e em torno de R\$ 6,62/km. Esse fato é consequência de um investimento muito maior em relação às alternativas²³.

²³ Esse valor não é comparável diretamente com as outras alternativas, pois são operações diferentes.

- O custo de combustível fica em torno de R\$ 3,33/km, também o maior entre as alternativas, o que é razoável dado que é um veículo de maior porte.
- Vale destacar, que a comparação com o diesel Euro VI não deve ser feita de forma direta, pois essa alternativa tem uma capacidade de passageiros superior. Assim, o indicador seria outro.

5.5 Cenários de introdução de frotas

Conforme mencionado acima, foram simulados seis cenários de introdução de frota que, basicamente, variam o número de veículos: 50, 200, 300, 450, 500 e 600. Os resultados apresentados nesta análise têm como foco totalizar o volume de investimentos na aquisição dos veículos, custos de combustíveis, custos de O&M e volume de combustível.

Os dados de custos são fundamentais para entender os esforços econômico-financeiros das alternativas. Por outro lado, o volume de combustível é uma variável fundamental para entender como implementar operações de gás natural e a demanda de produção de biometano no estado de Goiás. As Tabelas 3, 4, 5, 6, 7 e 8 apresentam todos esses valores para cada cenário de tamanho de frota.

Tabela 3: Cenário 50 veículos

Cenário 1 - 50 veículos	Diesel E6	GNV	Biometano	Dual
Investimento (mil R\$)	R\$ 45.000	R\$ 52.200	R\$ 52.200	R\$ 49.500
Custos anuais com combustível (mil de R\$)	R\$ 9.720	R\$ 8.230	R\$ 9.162	R\$ 9.790
Custos anuais com O&M (mil R\$)	R\$ 3.672	R\$ 3.852	R\$ 3.852	R\$ 3.852
Consumo anual de Diesel (L)	2.160.000	0	0	432.000
Consumo anual de GNV (m ³)	0	2.286.000	952.500	723.900
Consumo anual de Biometano (m ³)	0	0	1.365.000	1.131.000
Emissões anuais de GEE (tCO ₂)	5.710	4.870	3.676	3.9210
Mitigação de emissões (tCO ₂)	0	8340	2.033	2.499

Fonte: Elaboração dos autores

Tabela 4: Cenário 200 veículos

Cenário 2 - 200 veículos	Diesel E6	GNV	Biometano	Dual
Investimento (mil R\$)	R\$ 180.000	R\$ 208.800	R\$ 208.800	R\$ 198.000
Custos anuais com combustível (mil de R\$)	R\$ 38.880	R\$ 32.918	R\$ 36.648	R\$ 39.159
Custos anuais com O&M (mil R\$)	R\$ 14.688	R\$ 15.408	R\$ 15.408	R\$ 15.408
Consumo anual de Diesel (L)	8.640.000	0	0	1.728.000
Consumo anual de GNV (m ³)	0	9.144.000	3.810.000	2.895.600
Consumo anual de Biometano (m ³)	0	0	5.460.000	4.524.000
Emissões anuais de GEE (tCO ₂)	22.839	19.480	14.705	12.843
Mitigação de emissões (tCO ₂)	0	3.358	8.133	9.995

Fonte: Elaboração dos autores

Tabela 5: Cenário 300 veículos

Cenário 3 - 300 veículos	Diesel E6	GNV	Biometano	Dual
Investimento (mil R\$)	R\$ 270.000	R\$ 313.200	R\$ 313.200	R\$ 297.000
Custos anuais com combustível (mil de R\$)	R\$ 58.320	R\$ 49.378	R\$ 54.972	R\$ 58.738
Custos anuais com O&M (mil R\$)	R\$ 22.032	R\$ 23.112	R\$ 23.112	R\$ 23.112
Consumo anual de Diesel (L)	12.960.000	0	0	2.592.000
Consumo anual de GN (m3)	0	13.716.000	5.715.000	4.343.400
Consumo anual de Biometano (m3)	0	0	8.190.000	6.786.000
Emissões anuais de GEE (tCO2)	34.258	29.221	22.058	19.265
Mitigação de emissões (tCO2)	0	5.038	12.200	14.993

Fonte: Elaboração dos autores

Tabela 6: Cenário 450 veículos

Cenário 4 - 450 veículos	Diesel E6	GNV	Biometano	Dual
Investimento (mil R\$)	R\$ 405.000	R\$ 469.800	R\$ 469.800	R\$ 445.500
Custos anuais com combustível (mil de R\$)	R\$ 87.480	R\$ 74.066	R\$ 82.458	R\$ 88.108
Custos anuais com O&M (mil R\$)	R\$ 33.048	R\$ 34.668	R\$ 34.668	R\$ 34.668
Consumo anual de Diesel (L)	19.440.000	0	0	3.888.000
Consumo anual de GN (m3)	0	20.574.000	8.572.500	6.515.100
Consumo anual de Biometano (m3)	0	0	12.285.000	10.179.000
Emissões anuais de GEE (tCO2)	51.387	43.830	33.087	28.898
Mitigação de emissões (tCO2)	0	7.556	18.300	22.489

Fonte: Elaboração dos autores

Tabela 7: Cenário 500 veículos

Cenário 5 - 500 veículos	Diesel E6	GNV	Biometano	Dual
Investimento (mil R\$)	R\$ 450.000	R\$ 522.000	R\$ 522.000	R\$ 495.000
Custos anuais com combustível (mil de R\$)	R\$ 97.200	R\$ 82.296	R\$ 91.620	R\$ 97.897
Custos anuais com O&M (mil R\$)	R\$ 36.720	R\$ 38.520	R\$ 38.520	R\$ 38.520
Consumo anual de Diesel (L)	21.600.000	0	0	4.320.000
Consumo anual de GN (m3)	0	22.860.000	9.525.000	7.239.000
Consumo anual de Biometano (m3)	0	0	13.650.000	11.310.000
Emissões anuais de GEE (tCO2)	57.097	48.701	36.764	32.109
Mitigação de emissões (tCO2)	0	8.396	20.333	24.988

Fonte: Elaboração dos autores

Tabela 8: Cenário 600 veículos

Cenário 6 - 600 veículos	Diesel E6	GNV	Biometano	Dual
Investimento (mil R\$)	R\$ 540.000	R\$ 626.400	R\$ 626.400	R\$ 594.000
Custos anuais com combustível (mil de R\$)	R\$ 116.640	R\$ 98.755	R\$ 109.944	R\$ 117.477
Custos anuais com O&M (mil R\$)	R\$ 44.064	R\$ 46.224	R\$ 46.224	R\$ 46.224
Consumo anual de Diesel (L)	25.920.000	0	0	5.184.000
Consumo anual de GN (m3)	0	27.432.000	11.430.000	8.686.800
Consumo anual de Biometano (m3)	0	0	16.380.000	13.572.000

Emissões anuais de GEE (tCO2)	68.516	58.441	44.116	38.530
Mitigação de emissões (tCO2)	0	10.075	24.400	29.986

Fonte: Elaboração dos autores

De todos os dados apresentados, vale destacar os consumos de gás natural e biometano. Para o biometano, o cenário de 50 veículos apresenta um volume total anual de 1.365.000 m³ por ano, enquanto o volume anual consumido no cenário de 600 veículos é de 16.380.000 m³.

Com esses números é possível verificar se esse consumo seria atendido por uma planta de produção como a que está em fase de estudo de viabilidade pela empresa Jalles, no município de Goianésia. Conforme reunião realizada pelos pesquisadores do projeto com representantes da empresa, foi informada uma capacidade de produção **de 50 mil m³/dia** para essa planta.

Assim, convertendo os valores anuais acima descritos, tem-se:

- Cenário de 50 veículos: 6.500 m³/dia
- Cenário de 200 veículos: 26.000 m³/dia
- Cenário de 300 veículos: 39.000 m³/dia
- Cenário de 450 veículos: 58.250 m³/dia
- Cenário de 500 veículos: 65.000 m³/dia
- Cenário de 600 veículos: 78.000 m³/dia

Ou seja, em um projeto piloto de 50 veículos, não haveria problemas de atendimento da demanda de biometano. Contudo, para os casos acima de 450 veículos seriam necessários outros produtores desse combustível. Para os casos de 200 e 300 veículos seria necessário verificar a estratégia comercial do produtor de biometano em questão (Jalles) para verificar se haveria essa disponibilidade.

6. Análises de Sensibilidades

A análise de sensibilidade foi realizada para avaliar o impacto da variação de parâmetros-chave no Custo Total de Propriedade Nivelado (TCOn) e nas emissões para, assim, gerar-se informações mais completas para os tomadores de decisão. Foram consideradas as seguintes variáveis críticas:

- **Investimento (CAPEX):** para as alternativas GNV e Biometano, foram simulados aumentos de 20% e 40% no investimento inicial, contemplando possíveis variações nos preços de mercado e investimentos adicionais em infraestrutura de abastecimento local nas garagens.
- **Preços do Gás Natural:** variação de $\pm 20\%$ para simular diferentes fornecedores e modalidades de fornecimento (GNC ou GNL).
- **Preços do Biometano:** variação de $\pm 20\%$ para avaliar diferentes cenários de produção e logística, considerando diversos substratos e rotas de fornecimento.
- **Custos de Operação e Manutenção:** variação de $\pm 20\%$ nos custos de O&M para todas as alternativas tecnológicas, refletindo diferentes experiências operacionais reportadas no mercado.
- **Sazonalidade do Biometano:** foram analisados dois cenários alternativos de disponibilidade do biometano, com redução para 20% do tempo com uso de GN (maior disponibilidade de biometano) e para 5% do tempo com uso de gás natural (máxima disponibilidade de biometano, entendendo a necessidade de alguma complementariedade necessária do gás natural).
- **Combinação Sazonalidade e Preço do Biometano:** análise integrada considerando diferentes níveis de disponibilidade (20% ou 5% de GN) com variações de preço do biometano ($\pm 20\%$), para avaliar o impacto conjunto nos custos operacionais e emissões.

A Tabela 9 resume essas variáveis:

Tabela 9 – Variáveis das análises de sensibilidade

	GNV	Biometano	Dual	Observação/comentário
CAPEX	+40%, +20%	+40%, +20%		Simular investimentos em infraestruturas de abastecimento local
Preço GN	+/- 20%	+/-20%	+/-20%	Entender o impacto da variabilidade do preço do GN no TCO
Preço Biometano	+/- 20%	+/-20%	+/-20%	Entender o impacto da variabilidade do preço do biometano no TCO
Custos de O&M	+/- 20%	+/-20%	+/-20%	Entender o impacto da variabilidade dos custos de O&M no TCO
Sazonalidade		20% e 5%		Entender o impacto da maior disponibilidade de biometano nas emissões
Sazonalidade + preço biometano		Sazonalidade (20% ou 5%) e preço do biometano (+20% ou -20%)		Entender o impacto da maior disponibilidade de biometano nas emissões a diferentes preços

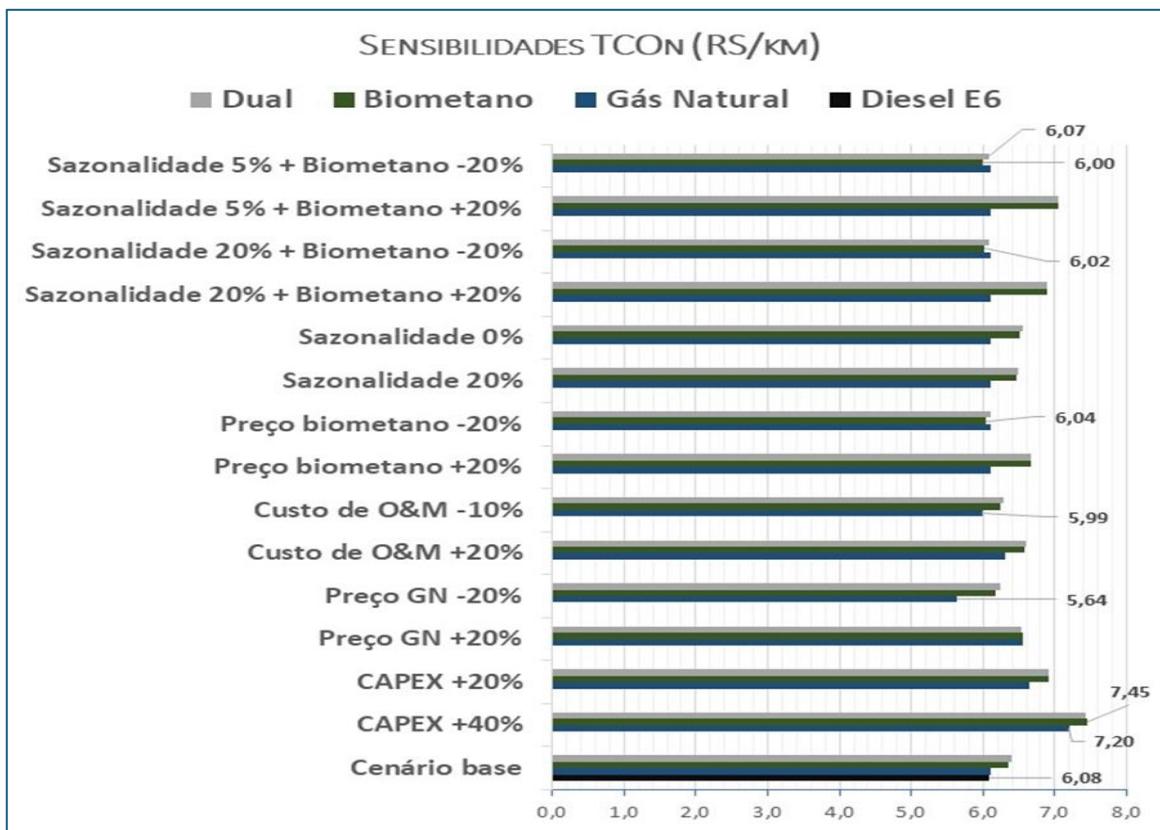
Fonte: Elaboração dos autores

Por fim, as análises de sensibilidade estão focadas nas alternativas a GNV e biometano, pois o entendimento é que estas apresentam maior viabilidade de implementação.

6.1 Resultados da Análise de Sensibilidade

As análises de sensibilidade confirmaram que a alternativa a Diesel Euro VI continua sendo a de menor custo econômico para a grande maioria dos cenários. Somente seis cenários apresentariam o TCO menor que o do caso base de 6,08 R\$/km do Diesel Euro VI: as alternativas de biometano com redução de 20% no preço do biometano, a alternativa a gás natural com redução de 20% no preço do GNV, a opção a GNV com redução nos custos de O&M em 10% e a opção dual com redução de 20% no preço do biometano e sazonalidade de 5%. A Figura 5 resume todos os cenários das variáveis da análise de sensibilidade.

Figura 5 – Resultados das análises de sensibilidade – TCO (R\$/km)

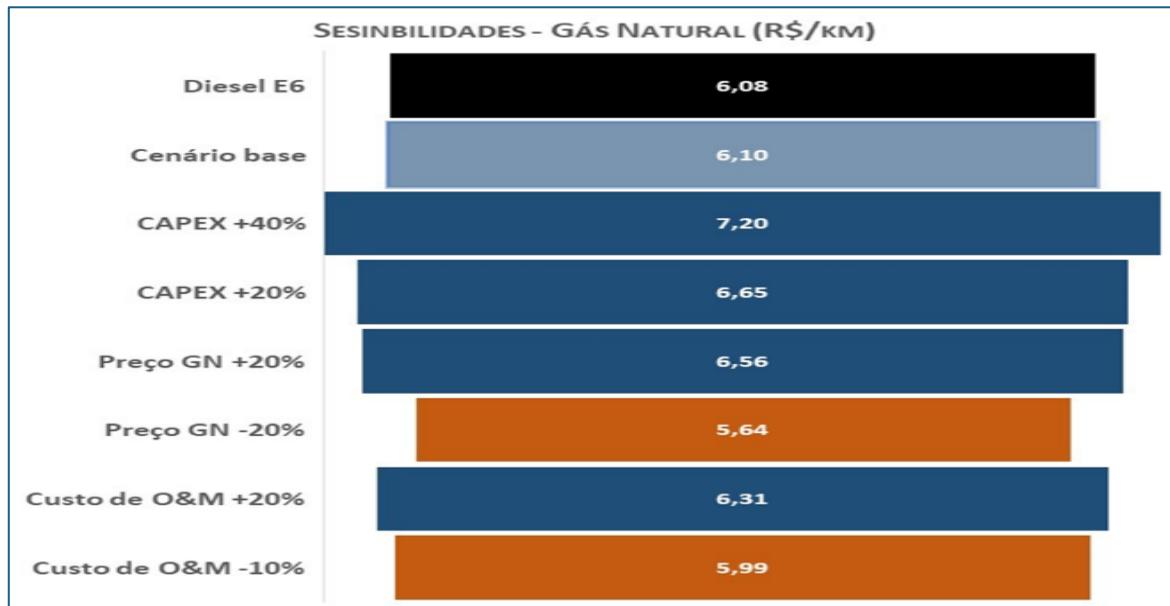


Fonte: Elaboração dos autores

Ainda assim, as simulações demonstram que o aumento nos custos de investimentos (CAPEX), que podem representar investimentos em infraestruturas de logística e abastecimento de GNV ou biometano, são as alternativas mais custosas economicamente. Isso indica a necessidade de uma análise cuidadosa do projeto, antes da tomada de decisão, para evitar escolhas inviáveis. Este tipo de situação é similar ao caso de veículos elétricos, que muitas vezes são analisados sem considerar os investimentos em infraestruturas de abastecimento.

Vale destacar, que a alternativa a GNV por conta da competitividade do caso base, tende a apresentar resultados positivos. A Figura 6 ilustra todos os casos de sensibilidade para a alternativa de GNV.

Figura 6 – Resultados das análises de sensibilidade para a alternativa de GNV – TCO (R\$/km)

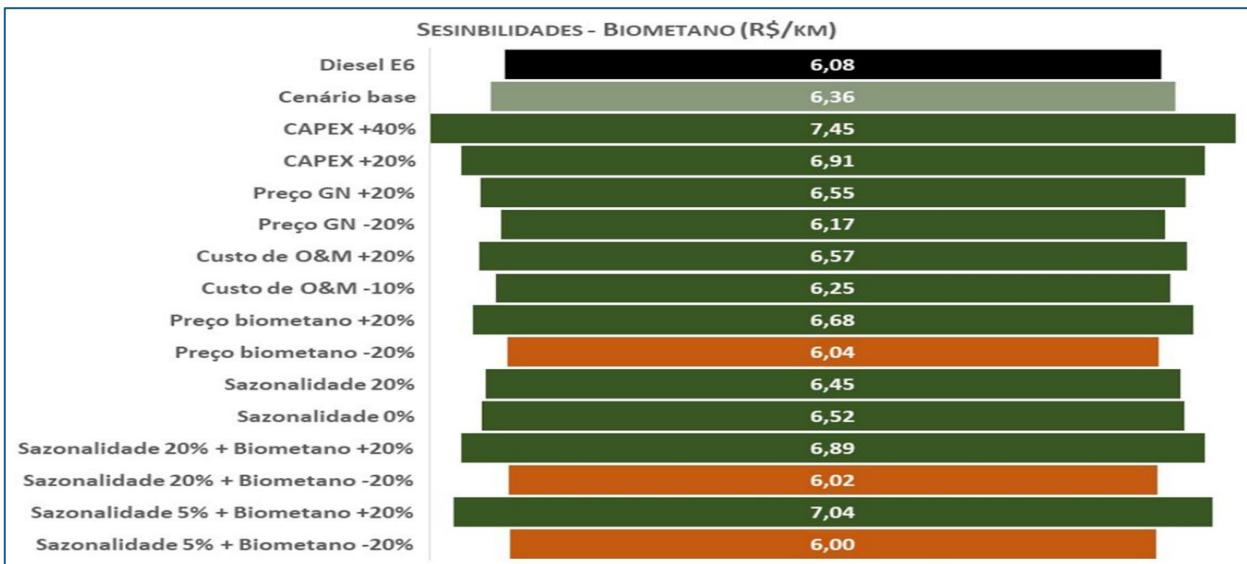


Fonte: Elaboração dos autores

Dois pontos aqui merecem ser destacados. Primeiro, o aumento dos investimentos pode levar as alternativas a ficarem de 9% a 18% mais altos que o caso base do Diesel Euro VI, corroborando a necessidade da análise cuidadosa de infraestruturas. Segundo, no caso de uma redução de custos de O&M, seja por conta de tempos mais longos entre manutenções ou por sistemas “mais limpos” (e.g. exaustão e motores), o custo da alternativa GNV é 1,5% menor.

Para a alternativa do biometano, os resultados são similares. Somente os casos de sensibilidade que utilizam a premissa do preço do biometano 20% menor encontram valores de TCO menores que do caso base do Diesel Euro VI. A Figura 7 apresenta todos os casos de sensibilidade para a alternativa a biometano. Contudo, a alternativa a biometano tende a apresentar maiores custos na maioria dos cenários, quando comparada as demais alternativas tecnológicas.

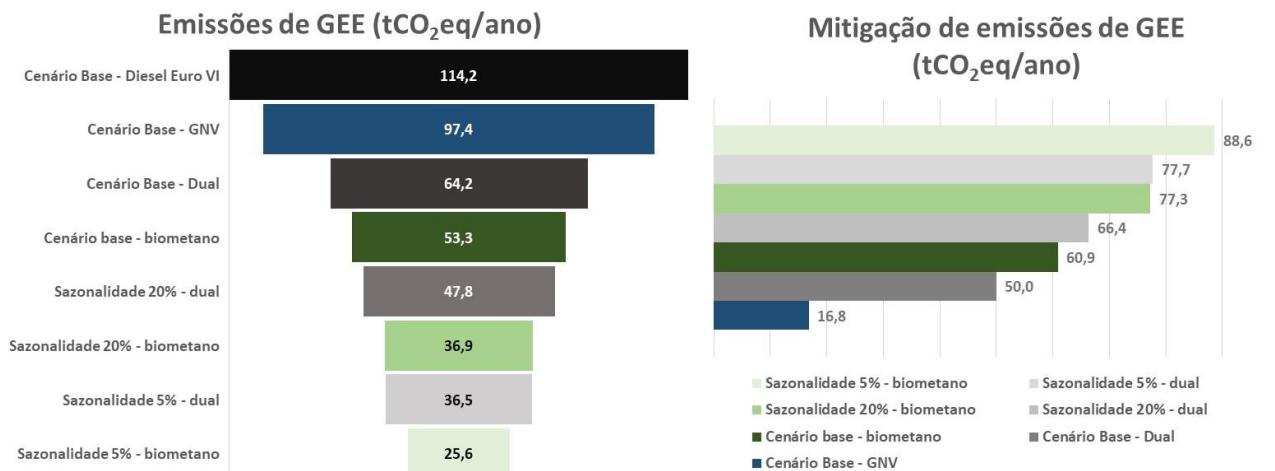
Figura 7 - Resultados das análises de sensibilidade para a alternativa de Biometano – TCO (R\$/km)



Fonte: Elaboração dos autores

Quando foco das análises são as emissões, como o esperado, as alternativas que têm maior participação do biometano têm o melhor desempenho. O cenário base da alternativa de biometano reduz em cerca de 35% as emissões quando comparadas com a base do Diesel Euro VI. Contudo, as análises de sensibilidades demonstram que essa mitigação pode ser muito alavancada caso haja uma maior disponibilidade de biometano, reduzindo em 60% para o caso da sazonalidade de somente 20% e em 75% para o caso da sazonalidade de 5%. Vale destacar que as emissões da alternativa dual acompanham essa redução, pois foi considerado o biometano com combustível prioritário quando disponível. A Figura 8 ilustra essa redução.

Figura 8 – Resultados das análises de sensibilidade as emissões e mitigação de emissões de GEE



Fonte: Elaboração dos autores

6.2 Resultados da análise de sensibilidade para os cenários de diferentes frotas

A segunda parte das análises de sensibilidade concentrou-se em explorar os possíveis impactos das diferentes variáveis nos valores totais para diferentes tamanhos de frota. **As análises apresentadas a seguir focam em três tamanhos de frota: 50, 200 e 500 veículos.** A escolha desses tamanhos decorre do entendimento previamente exposto de que frotas de até 200 veículos poderiam ser atendidas pela produção de biometano que entrará em operação em 2025. A frota de 500 veículos foi selecionada com base no anúncio de que o estado pretende colocar em operação 500 veículos movidos a GNV ou biometano²⁴.

Em termos de variáveis, as análises focam em três dimensões para a seleção:

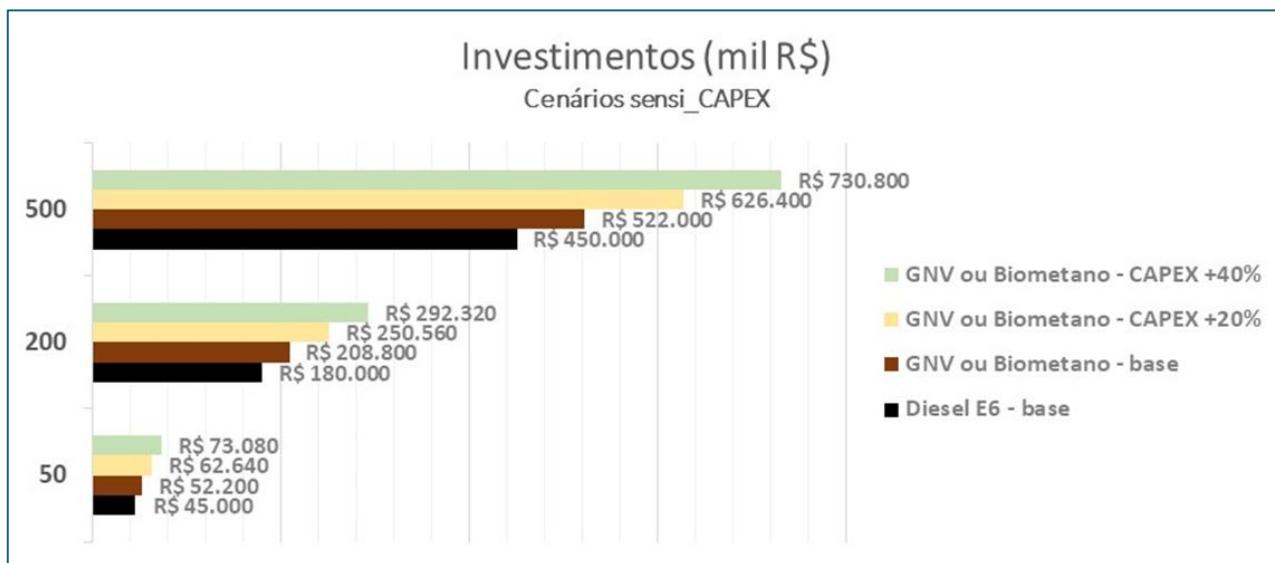
- **Custos Totais com Investimentos:** explorados por meio das variações de CAPEX, buscam compreender quais seriam os montantes adicionais de investimento para casos de aportes maiores, simulando possíveis investimentos em infraestrutura de abastecimento.
- **Custos Totais com Combustíveis:** analisados através das variáveis de preços de GNV, preços de biometano e sazonalidade do biometano, objetivam compreender as resultantes em termos de volumes anuais para os diferentes cenários.
- **Emissões:** exploradas através de variações de biometano e simulando maior oferta deste combustível, visam determinar os totais de mitigação de emissões possíveis.

6.2.1 Sensibilidade nos investimentos totais em frota (CAPEX do ônibus)

Os resultados de simulações, ilustrados na Figura 9, indicam que para frotas de 50 ônibus a faixa de investimento adicional (em relação a alternativa base do Diesel Euro VI) é de até 28 milhões de reais. Já para frotas de 200, esse investimento adicional pode ser de até 112 milhões de reais. Para frotas de 500 ônibus, esse investimento adicional é de até 280 milhões de reais. Esses investimentos adicionais podem ser entendidos como uma margem de risco de investimentos, necessitando uma análise projeto a projeto para verificar a necessidade de infraestrutura de logística, armazenamento e abastecimento de combustíveis.

²⁴ <https://www.maisgoias.com.br/coluna/domingsos-ketelbey/goias-prepara-aquisicao-de-500-onibus-movidos-a-biometano-para-o-transporte-coletivo-da-grande-goiania/>

Figura 9 – Resultados das análises de sensibilidade para investimentos totais com diferentes CAPEX e para diferentes frotas



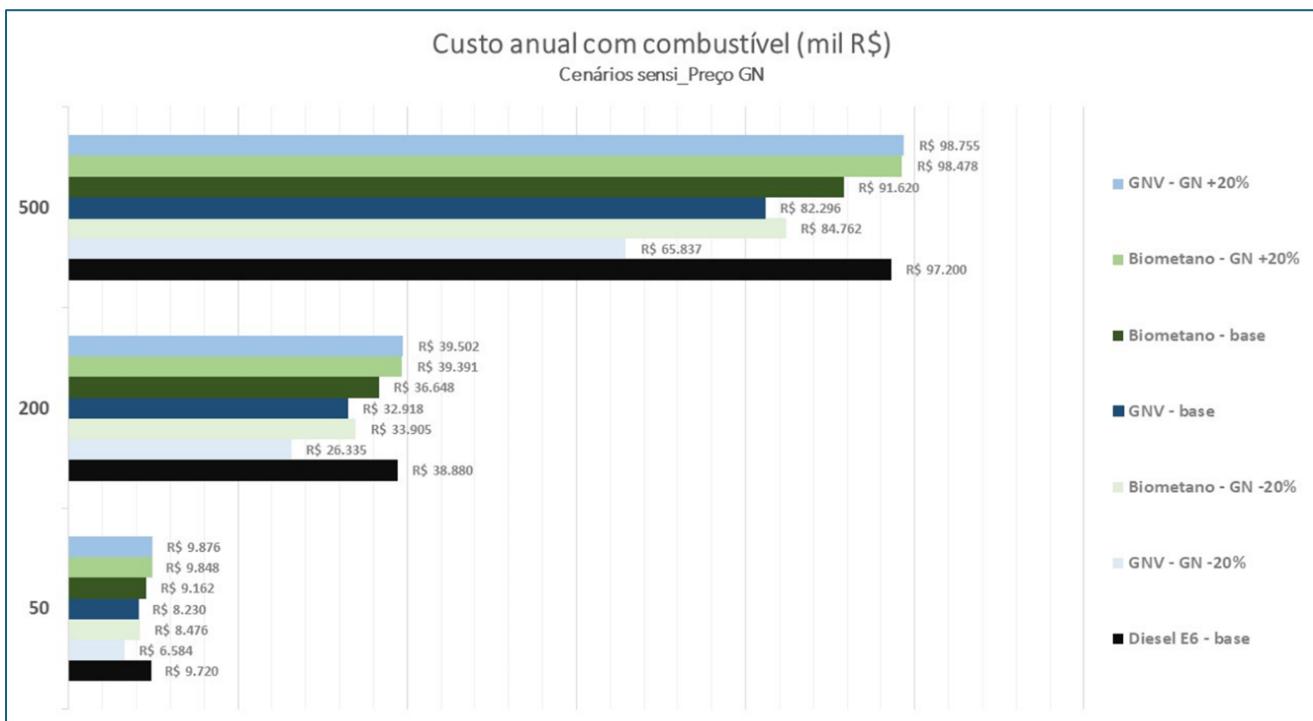
Fonte: Elaboração dos autores

6.2.2 Sensibilidade nos custos totais com combustíveis

- *Preços de gás natural*

As alternativas a GNV e biometano já apresentam custos com combustíveis mais baixos quando comparadas à alternativa diesel, cerca de 15,3% e 5,7%, respectivamente. **Ao considerar um cenário de redução de 20% nos preços do gás natural**, observa-se uma amplificação significativa desta vantagem econômica, com a alternativa GNV apresentando economia de 32% e o biometano de 13%. Entretanto, quando analisado o **cenário adverso com aumento de 20% no preço do gás natural**, verifica-se uma inversão do benefício econômico, resultando em um acréscimo de 1,5% nos custos para as duas alternativas, GNV e biometano, em comparação ao caso base do Diesel Euro VI. A Figura 10 mostra esses valores para diferentes tamanhos.

Figura 10 – Sensibilidade dos Custos Totais com Combustíveis aos preços de gás natural

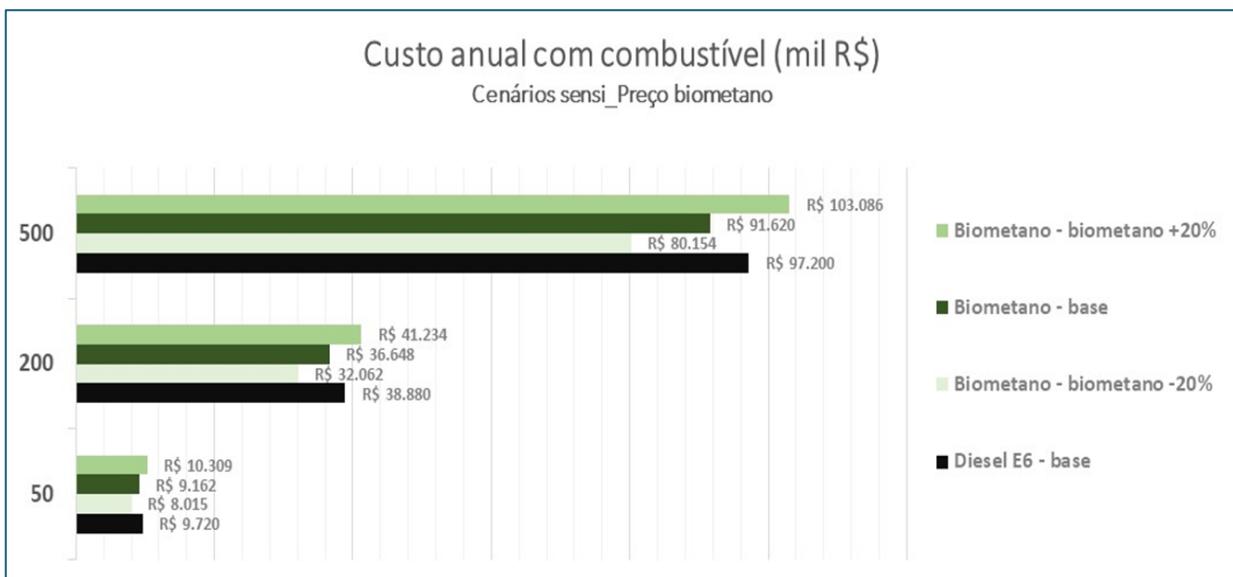


Fonte: Elaboração dos autores

- *Preços de biometano*

A análise específica da alternativa biometano demonstra uma vantagem econômica inicial nos custos totais com combustíveis, apresentando uma redução de 5,7% em relação à alternativa diesel. Em um **cenário de redução de 20% no preço da molécula do biometano**, esta vantagem se intensifica substancialmente, alcançando uma economia de 17,5% em comparação ao diesel. Contudo, ao se considerar um **cenário de aumento de 20% no preço da molécula**, observa-se uma inversão da vantagem econômica, resultando em um acréscimo de 6% nos custos totais com combustível quando comparado à alternativa diesel, evidenciando também a sensibilidade significativa do projeto às variações no preço do biometano, como demonstrado na Figura 11.

Figura 11 – Sensibilidade dos Custos Totais com Combustíveis aos preços do biometano



Fonte: Elaboração dos autores 1

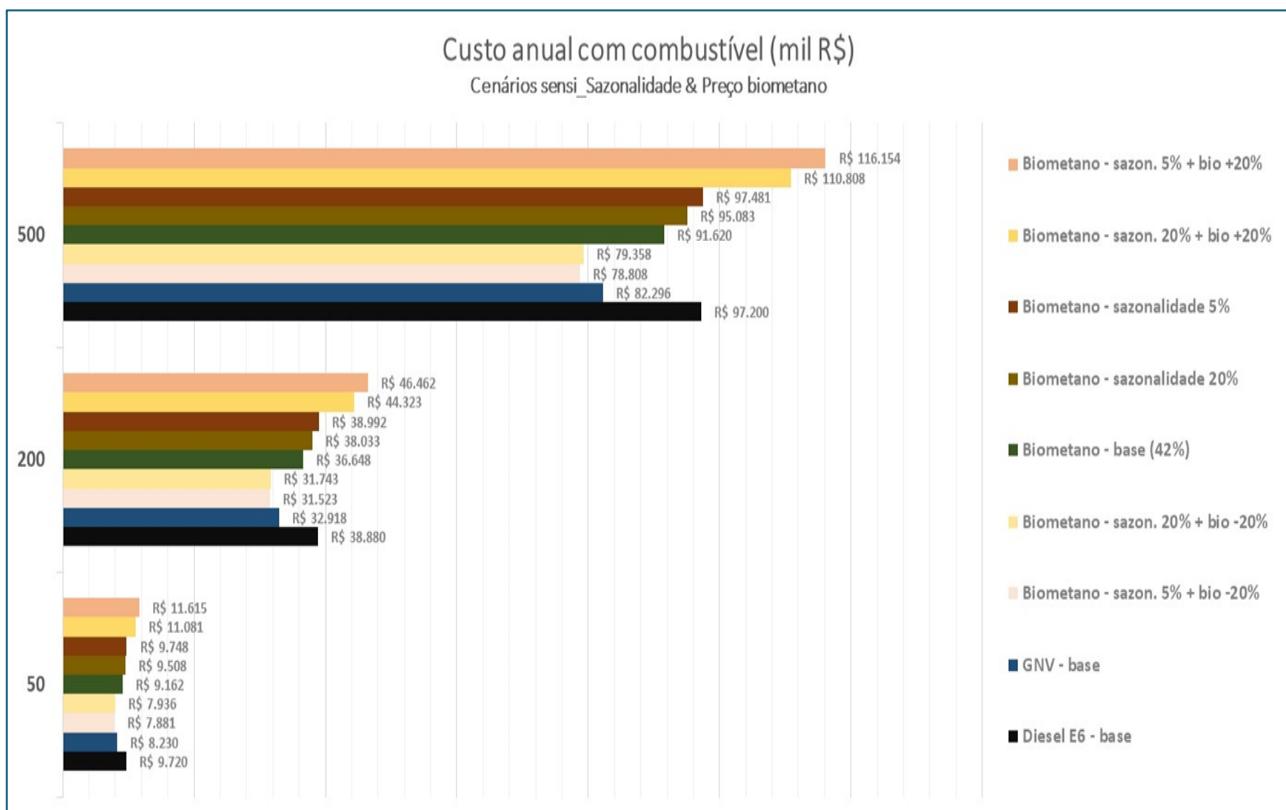
– *Sazonalidades e preços de biometano*

As sazonalidades na produção de biometano também afetam os custos totais com combustíveis, pois há a premissa de priorização do biometano por seus benefícios ambientais. Para isso, o estudo avaliou estas influências sazonais em conjunto com as variações nos preços do biometano, abrangendo diferentes cenários de disponibilidade de produção e suas combinações com as variações de preço.

Os resultados da análise indicam que apenas os cenários com aumento de 20% no preço do biometano apresentariam custos totais superiores ao caso base diesel. Notavelmente, nestas situações, devido à maior utilização de biometano, os custos superariam inclusive o cenário com aumento de 20% no preço e sazonalidade base de 42%, como discutido anteriormente (Figura 12).

Por outro lado, a análise revela um aspecto promissor: mesmo com uma disponibilidade elevada de 95% (representando uma sazonalidade de apenas 5%), os custos totais com combustíveis permaneceriam inferiores à alternativa base do Diesel Euro VI. Esta constatação sugere a viabilidade de expansão da produção de biometano, desde que associada a políticas adequadas de incentivos de preço.

Figura 12 – Sensibilidade dos Custos Totais com Combustíveis às sazonalidades e aos preços do biometano



Fonte: Elaboração dos autores

6.2.3 Sensibilidade nas emissões de GEE

A análise dos impactos nas emissões totais de gases de efeito estufa, e sua mitigação em relação ao caso base do Diesel Euro VI, demonstra que apenas a disponibilidade do biometano, representada pela sazonabilidade, influencia os resultados.

No cenário base de biometano, com sazonabilidade de 42%, observa-se uma mitigação de emissões de 35% em comparação ao caso base diesel. Esta redução se intensifica significativamente quando a sazonabilidade diminui, alcançando aproximadamente 60% com sazonabilidade de 20%, e chegando a 75% quando a disponibilidade atinge 95% (sazonabilidade de 5%).

Para contextualizar o impacto ambiental significativo do aumento da disponibilidade de biometano, uma análise comparativa considerando diferentes tamanhos de frota foi realizada. Em uma frota de 200 ônibus, a redução da sazonabilidade para 20% e 5% equivaleria à retirada adicional de circulação de 47 e 79 ônibus a diesel, respectivamente. Em uma escala maior, considerando uma frota anunciada de 500 ônibus, o benefício ambiental seria ainda mais expressivo, equivalendo à retirada adicional de 117 ônibus a diesel no cenário com sazonabilidade de 20%, e 199 ônibus quando a sazonabilidade atinge 5%. A Figura 13 apresenta os valores totais de mitigação de emissões de GEE

Figura 13 – Sensibilidade da mitigação de emissões de GEE às sazonalidades de produção de biometano



Fonte: Elaboração dos autores

7. Considerações finais

7.1 Conclusões do Estudo e Simulações

As simulações econômicas revelaram que os ônibus a diesel Euro VI ainda apresentam o menor Custo Total de Propriedade Nivelado (TCOn) de R\$ 6,08/km, evidenciando um desafio para a adoção imediata de tecnologias alternativas como as consideradas neste relatório.

O biometano destaca-se como a principal alternativa para redução significativa de emissões, proporcionando uma diminuição de aproximadamente 35% nas emissões de gases de efeito estufa em comparação com o diesel. Esta redução pode chegar a 75% quando a disponibilidade do biometano atinge 95%.

Adicionalmente, a alternativa que utiliza exclusivamente gás natural também pode resultar em uma mitigação de aproximadamente 15% nas emissões, dependendo do fator de emissão e da rota tecnológica empregada. Vale destacar que a alternativa GNV já é competitiva com a alternativa base Diesel Euro VI.

No caso específico dos ônibus articulados, observou-se um TCOn substancialmente maior, aproximadamente R\$ 13,43/km, com o custo de aquisição representando cerca de R\$ 6,62/km do total. Esta análise demanda considerações adicionais não contempladas no escopo atual, como a capacidade de transporte de passageiros e a otimização de rotas, para uma avaliação mais precisa de sua viabilidade econômica.

É importante notar que as alternativas de biometano e tecnologia *dual-fuel* apresentam os menores TCOn entre as opções alternativas, indicando potencial para redução de custos operacionais a longo prazo. No entanto, existe um claro *trade-off* entre o custo inicial mais elevado dessas tecnologias alternativas e os benefícios econômicos e ambientais de longo prazo.

A tecnologia *dual-fuel* se apresenta como uma opção pouco interessante, com um custo maior e com uma mitigação menor que a alternativa a biometano. Mesmo que essa alternativa ofereça flexibilidade operacional, ela apresenta eficiência menores. Além disso, o risco associado a poucas operações comerciais, limitada disponibilidade e experiência de mercado com essa tecnologia no Brasil, sugere precaução com a sua adoção.

As análises de sensibilidade revelaram que seis cenários apresentariam TCOn menor que o diesel Euro VI: as alternativas de biometano e dual quando combinadas baixa sazonalidade (5%) e redução de 20% no preço do biometano, a alternativa com o preço de GNV menor em 20% e a alternativa a GNV quando os custos de O&M são reduzidos em 10%. O aumento nos custos de investimentos (CAPEX) pode tornar as alternativas de 13% a 22% mais custosas que o diesel Euro VI; e o TCOn é bastante sensível aos preços praticados de gás natural e biometano.

7.2 Recomendações para Tomada de Decisão

As análises realizadas sugerem três principais recomendações. Primeiro, a transição para uma mobilidade sustentável transcende a mera substituição tecnológica de veículos, demandando um planejamento urbano integrado e abrangente.

Segundo, a indústria do biogás e biometano deve ser uma das prioridades para Goiás, considerando que estes são insumos cuja produção pode viabilizar uma significativa transição energética e tecnológica para o estado. As análises de sensibilidade demonstram que o aumento da disponibilidade no estado pode adicionar um benefício ambiental para frotas de 500 ônibus equivalentes a 199 ônibus. Ou seja, para esse tamanho de frota um aumento da disponibilidade de 68% para 95% reduziria emissões equivalentes a 199 ônibus a Diesel Euro VI.

Contudo, é fundamental uma avaliação sistêmica para uma maior disponibilidade de biometano. Avaliar outras aplicações potenciais do biometano, como seu uso industrial e no transporte pesado de cargas, bem como as ações necessárias para estruturar essa indústria e criar um mercado robusto são análise básicas para identificar como estruturar e incentivar essa nova indústria no estado.

Terceiro, o desenvolvimento da indústria de gás natural em Goiás, por outro lado, requer uma análise mais ampla, contemplando variáveis não incluídas neste estudo, como investimentos em infraestrutura de transporte de gás e alinhamento com políticas energéticas nacionais. Como o estado não possui infraestrutura de distribuição de gás natural, os custos para a sua aquisição se tornam, consequentemente, mais altos que em outras unidades da federação que não têm essa carência. Estas considerações são cruciais para garantir a viabilidade e sustentabilidade de projetos a longo prazo.

No caso da escolha por sistemas de transporte de passageiros a biometano, as simulações e os cenários de penetração sugerem que operações pequenas como de 50 ou 200 veículos poderiam ser atendidas com planta de produção de biometano, ora em processo de estudo de viabilidade econômica por parte da empresa Jalles. Contudo, operações maiores demandariam estímulos a outros produtores de biometano ou importação desse biocombustível de outro estado.

Para viabilizar a implementação bem-sucedida do biometano no transporte público de Goiás, é fundamental desenvolver análises aprofundadas que contemplem:

- o mapeamento dos potenciais locais de produção;
- soluções logísticas eficientes para distribuição;
- estimativas detalhadas de custos de produção;
- avaliação da competitividade entre diferentes usos do biometano;
- diagnóstico abrangente dos impactos socioeconômicos para o estado.

Adicionalmente, é crucial identificar as barreiras e oportunidades específicas do biometano em Goiás, estabelecendo uma base sólida para o desenvolvimento de políticas públicas efetivas. Essas análises vêm sendo realizadas para outras unidades da federação como, por exemplo, o estado de São Paulo.

O sucesso desta transição energética dependerá da implementação de um conjunto coordenado de políticas públicas, incluindo:

- Incentivos para redução dos custos de investimentos iniciais;
- incentivos para redução dos custos de infraestrutura e logística do biometano;
- mecanismos para estimular a demanda;
- programas de desenvolvimento da cadeia de fornecimento;
- estratégias para garantir a competitividade dos preços.

Estas medidas, quando adequadamente estruturadas, criarão um ambiente propício para investimentos em projetos de biometano, maximizando os benefícios econômicos e ambientais para o estado de Goiás.

8. Referências

- Agência Gov. (2024, fevereiro 29). *Mistura de 14% de biodiesel no diesel - Agência Gov.* <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202402/mistura-de-14-de-biodiesel-no-diesel-comeca-a-valer-nesta-sexta-feira#:~:text=Em%20dezembro%20de%202023%2C%20o,1%C2%BA%20de%20mar%C3%A7o%20de%202025.>
- Associação Nacional de Transportes Públicos. (2023). *Custos dos serviços de transporte público por ônibus elétrico: metodologia de cálculo e parâmetros.*
- Barassa, E., Cruz, R. F. da, Faria, L. G. D., Tanure, T. M. do P., Rodríguez, T. B., & Rigon, V. (2022). *Oferta de ônibus elétrico no Brasil em um cenário de recuperação econômica de baixo carbono.* https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47833/1/S2100966_pt.pdf
- Basma, H., Saboori, A., Rodriguez, F., 2021. Total cost of ownership for tractor-trailers in Europe: Battery electric versus diesel - International Council on Clean Transportation.
- Blog RMTC Goiânia. (2013, junho 5). *Ônibus passam por manutenção para diminuir a emissão de gases poluentes Categoría: Por dentro da Rede.* <https://www.rmtcgoiania.com.br/blog/2013/06/05/onibus-passam-por-manutencao-para-diminuir-a-emissao-de-gases-poluentes/>
- BloombergNEF. (2020). *BNEF EVO Report 2020 | BloombergNEF | Bloomberg Finance LP.*
- CDTC. (2022). Deliberação Nº 01, de 25 de Fevereiro de 2022. Em CMTC (p. 1–6). <https://cmtcrmrg.com.br/wp-content/uploads/2023/08/Deliberacao-01-2022-Nova-RMTC.pdf>
- CDTC. (2023). *Deliberação Nº 9, de 27 de Outubro de 2023* (p. 1–5). <https://cmtcrmrg.com.br/wp-content/uploads/2023/11/Deliberacao-09-2023-Reestrutura-e-amplia-RMTC.pdf>
- CDTC. (2024). *Deliberação Nº 13, de 5 de agosto de 2024.* <https://cmtcrmrg.com.br/wp-content/uploads/2024/08/DELIBERACAO-No-13-2024-05.08.2024-ASSINADO-1.pdf>
- CMTC. (2007). *Concorrência 01/2007 - Concessão dos serviços do Sistema Integrado de Transporte da Rede Metropolitana de Transportes Coletivos da Região Metropolitana de Goiânia - SIT-RMTC: Anexo I.4-Especificação básica dos veículos da frota* (CMTC, Org.). www.goiania.go.gov.br/sistemas/silic/dados/m011/2007/L011008200700010326.pdf
- CMTC. (2024a). *Sobre a CDTC.* <https://cmtcrmrg.com.br/sobre-a-cdtc/>
- CMTC. (2024b). *Sobre a CMTC.* <https://cmtcrmrg.com.br/sobre-a-cmtc/>
- CMTC. (2024c). *Sobre a RMTC.* <https://cmtcrmrg.com.br/sobre-a-rmtc/>

- D'Agosto, M. de A., Goes, G. V., Gonçalves, D. N. S., & Costa, M. G. da. (2022). Cenários de penetração de ônibus com sistema dual-fuel diesel-gás no transporte coletivo do Rio de Janeiro / Penetration scenarios for dual-fuel diesel-gas buses in public transportation in Rio de Janeiro. *Brazilian Journal of Development*, 8(4), 27558–27571.
<https://doi.org/10.34117/bjdv8n4-314>
- Dallmann, T. (2019). *Climate and air pollutant emissions benefits of bus technology options in São Paulo*. www.theicct.orgcommunications@theicct.orgACKNOWLEDGMENTS
- Ellram, L.M., 1995. Total cost of ownership. *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.* 25, 4–23.
<https://doi.org/10.1108/09600039510099928>
- EPE, 2022. Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário. Intensidade de carbono das fontes de energia. Rio de Janeiro. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-708/NT-EPE-DPG-SDB-2022-03_Intensidade_de_carbono_Transporte_Rodoviario.pdf
- Freitas, Felipe; Almeida, Edmar de; Soares, Gustavo (2025). Inconsistências no Renovabio e seus impactos sobre o Programa Nacional de Descarbonização do Gás Natura.
Disponível em: <https://ensaioenergetico.com.br/inconsistencias-no-renovabio-e-seus-impactos-sobre-o-programa-nacional-de-descarbonizacao-do-gas-natural/>
- GOIÁS. (2021). *LEI COMPLEMENTAR Nº 169/2021* (169). Diário Oficial do Estado de Goiás.
<https://legisla.casacivil.go.gov.br/api/v2/pesquisa/legislacoes/104731/pdf>
- Goiás - SGG. (2024). *Nova Rede Metropolitana de Transporte Coletivo*. Subsecretaria de Políticas para Cidades e Transporte.
- Governo de Goiás. (2024a, fevereiro 8). *Goiânia é a única capital entre os estados do País com tarifa de ônibus congelada desde 2019*. Secretaria Geral de Governo - SGG.
<https://goias.gov.br/governo/goiania-e-a-unica-capital-entre-os-estados-do-pais-com-tarifa-de-onibus-congelada-desde-2019/>
- Governo de Goiás. (2024b, agosto 20). *Governo entrega 60 ônibus do transporte coletivo*.
<https://goias.gov.br/governo-entrega-60-onibus-do-transporte-coletivo/>
- Governo de Goiás - SGG. (2024, agosto 27). *Governo de Goiás amplia operação com ônibus elétricos do Eixo Anhanguera para Goianira e Trindade*.
<https://goias.gov.br/governo/governo-de-goias-amplia-operacao-com-onibus-eletricos-do-eixo-anhanguera-para-goianira-e-trindade/>
- International Energy Agency (IEA). (2022). *Global EV Outlook 2022 Securing supplies for an electric future*. <https://www.iea.org/events/global-ev-outlook-2022>
- LABTRANS. (2024a). *Atualização e elaboração do Plano Diretor de Transportes Urbanos (PDTU) e Plano de Mobilidade Urbana Sustentável (PMUS) do Distrito Federal - Produto 2: Relatório de levantamento de informações*.

LABTRANS. (2024b). *Atualização e elaboração do Plano Diretor de Transportes Urbanos (PDTU) e Plano de Mobilidade Urbana Sustentável (PMUS) do Distrito Federal - Relatório da Audiência Pública 01.*

Mansoor J. A. Khan, Nuri Cihat Onat, 2022. Comprehensive Total Cost of Ownership Framework for Alternative Fuel Public Transportation Buses. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2677.

ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2018). *Objetivo 11. Ciudades y comunidades sostenibles.*

Prefeitura Municipal de Goiânia. (2024). PlanmobGyn: Plano de Mobilidade Urbana de Goiânia. Coord.: Secretaria Municipal de Planejamento Urbano e Habitação - SEPLANH. Comissão Executiva do Plano Diretor. Goiânia, 1^a ed., 1–421.

RedeMob Consórcio. (2024a). *RedeMob Consórcio.* <https://cmtcrmg.com.br/redemob-consorcio/>

RedeMob Consórcio. (2024b). *RedeMob Consórcio - Overview.* <https://www.linkedin.com/company/redemob-cons>

São Paulo. (2018). *Lei Nº 16.802, de 17 de Janeiro de 2018.* <https://www.saopaulo.sp.leg.br/iah/fulltext/leis/L16802.pdf>

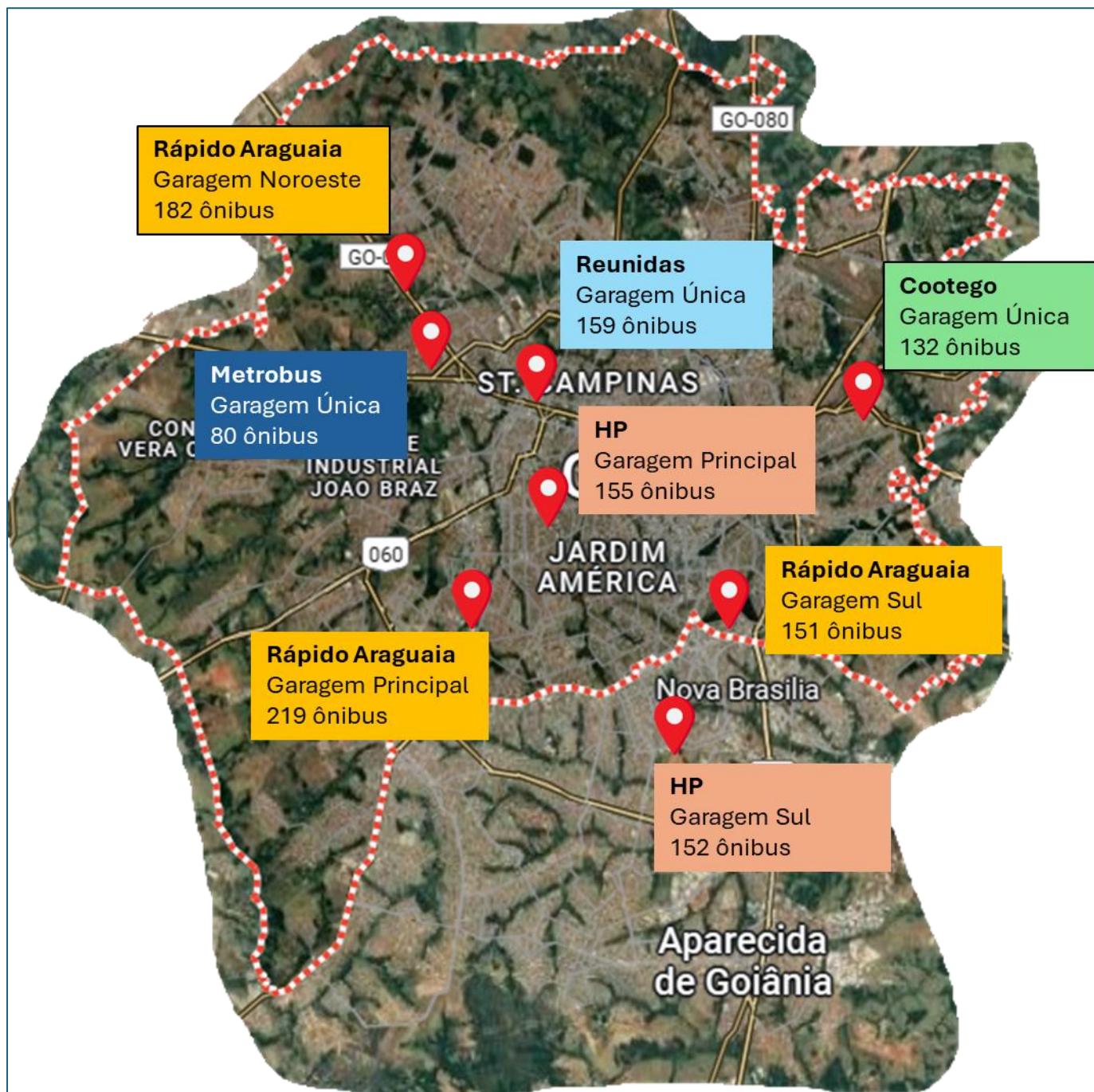
Topal, O., Nakir, İ., 2018. Total cost of ownership based economic analysis of diesel, CNG and electric bus concepts for the public transport in Istanbul City. *Energies* 11. <https://doi.org/10.3390/EN11092369>

WRI. (2018). *Mobilidade não é sinônimo de transporte | WRI Brasil.* Programa de Cidades. <https://www.wribrasil.org.br/noticias/mobilidade-nao-e-sinonimo-de-transporte>

ANEXO I

Localização de garagens e distribuição da frota da SIT-RMTC

Figura 14: Mapa da localização de garagens e suas respectivas frotas



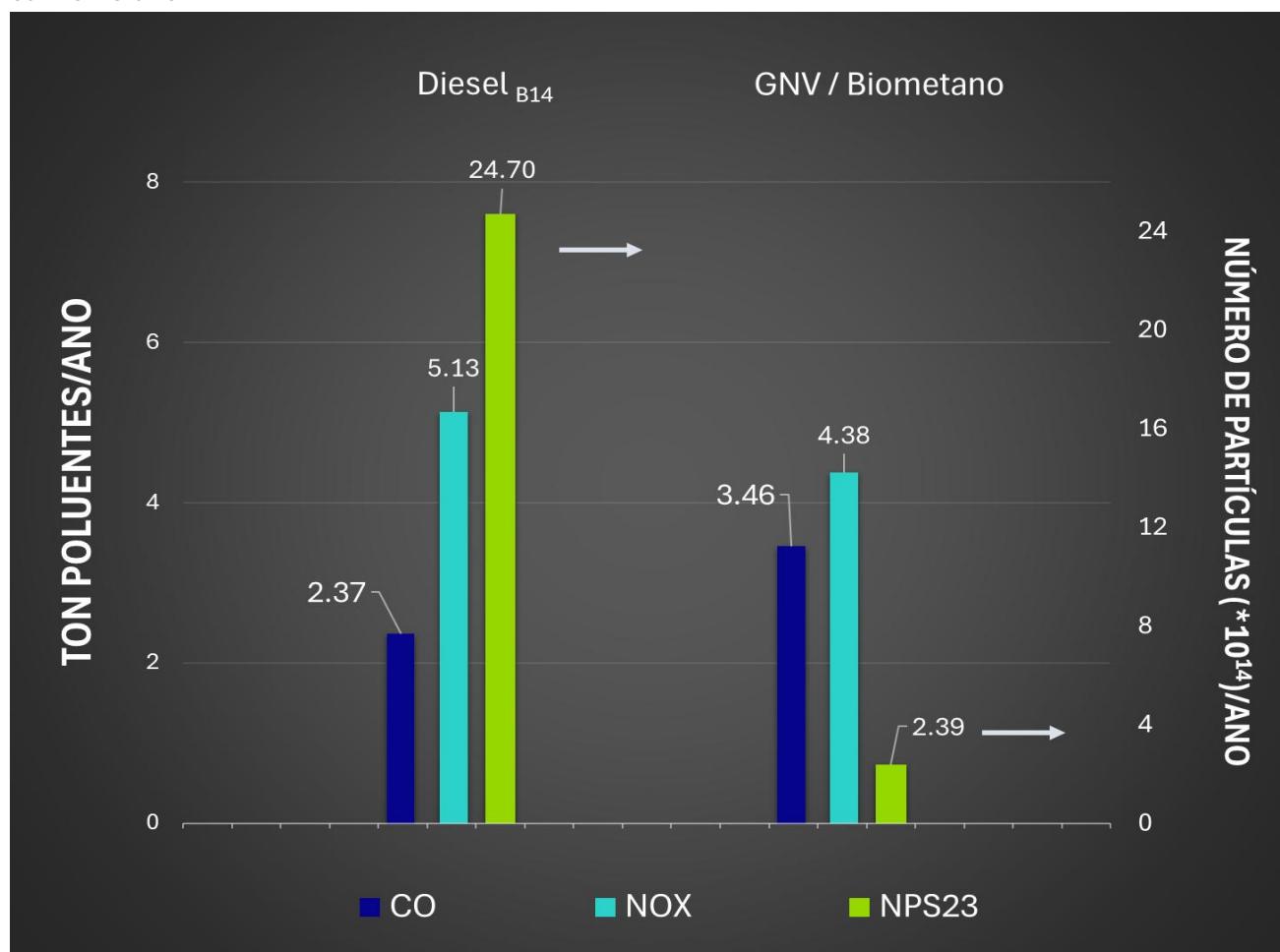
Fonte: Elaboração dos autores com base em dados informados pelo RedeMob

ANEXO II

Análise da mitigação de poluentes locais (CO, NO_x e NPS)

A estimativa de emissão de poluentes locais para a frota de 50 veículos foi baseada nos fatores de emissão reportados no artigo publicado por Gioria *et al.* no ano de 2024 [9]. Nesse trabalho, os níveis de emissões de poluentes locais para dois modelos de ônibus EURO VI à diesel ou GNV foram quantificados. Para tanto, dois experimentos distintos foram conduzidos, especificamente: teste em estrada com dispositivo portátil de medição de emissões e teste em laboratório. A média dos resultados publicados foram utilizados para o cálculo das emissões anualizadas de poluentes locais, nomeadamente CO, NO_x e número de partículas sólidas, conforme ilustrado na **Figura 3**.

Figura 15: Emissões de poluentes locais: frota de 50 ônibus movidos a Diesel B14 e Gás Natural Veicular ou Biometano



Fonte: Elaboração dos autores

A substituição dos veículos a Diesel B₁₄ reduz em 14,6 e 90,3% as emissões de NOx e NPS, respectivamente. Por outro lado, um aumento de aproximadamente 46,0% nas emissões de monóxido de carbono foi observado nesse mesmo cenário. É importante pontuar que os fatores de emissões para poluentes locais são altamente sensíveis aos modelos de cada veículos, especialmente devido as diferentes tecnologias de purificação de gases e retenção de materiais particulados disponíveis no mercado. Nesse sentido, grandes variações de valores são esperadas a depender dos fatores de emissão característicos de cada operação.