



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Micael Dalpisol

**IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DE
CONSUMO DE COMBUSTÍVEL PARA DIFERENTES CONDIÇÕES
RODOVIÁRIAS**

Santa Maria, RS

2023

Micael Dalpisol

**IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DE
CONSUMO DE COMBUSTÍVEL PARA DIFERENTES CONDIÇÕES
RODOVIÁRIAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Deividi da Silva Pereira

Coorientador: Me. Renan Gustavo Scherer

Santa Maria, RS

2023

Micael Dalpisol

IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DE CONSUMO DE
COMBUSTÍVEL PARA DIFERENTES CONDIÇÕES RODOVIÁRIAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Civil

Aprovado em ___ de março de 2023:

Deividi da Silva Pereira, Prof. Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Renan Gustavo Scherer, Me. (UFSM)
(Coorientador)

Jaime Freiburger Junior, Prof. Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS

2023

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de dedicar alguns momentos para expressar minha profunda gratidão a todos que me apoiaram durante todo o processo de construção do conhecimento na Universidade Federal de Santa Maria e na elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). A realização disso não teria sido possível sem a ajuda e o incentivo de cada um de vocês.

À minha família, quero expressar minha eterna gratidão por me dar apoio emocional, financeiro e logístico ao longo dessa jornada. Suas palavras de encorajamento e incentivo sempre me deram forças para continuar. Agradeço a vocês por sempre terem acreditado em mim e me apoiado em todas as etapas desta jornada.

À minha companheira, quero agradecer por todo o apoio, amor e paciência. Você foi muito importante nesta caminhada, sempre me apoiando e me ajudando a superar as dificuldades. Sem você, eu não teria conseguido chegar até aqui.

Aos meus professores, eu quero expressar minha profunda admiração e agradecimento por todo o conhecimento, orientação e feedbacks que recebi durante todo o processo de construção do conhecimento. Obrigado por dedicar seu tempo e compartilhar seu conhecimento para me ajudar a evoluir dia após dia.

Por fim, aos meus colegas de classe, agradeço pelas oportunidades de aprendizado, pelas discussões enriquecedoras, pelos trabalhos em equipe e pelas amizades que construímos ao longo do caminho. Sou grato pelos momentos de descontração e diversão que compartilhamos, e especialmente aos colegas que me ajudaram em momentos de dificuldade. Vocês são exemplos de solidariedade e amizade, e tenho orgulho de chamá-los de colegas.

Mais uma vez, agradeço a todos vocês por me apoiarem nesta jornada. Espero que esta conquista não seja apenas minha, mas de todos nós. Com certeza, levarei comigo as lições aprendidas em todos os anos de universidade e as lembranças inesquecíveis que vivenciei durante todo esse processo.

Muito obrigado!

“FAÇA O QUE PUDER,
COM O QUE TIVER,
ONDE ESTIVER!”
(Theodore Roosevelt)

RESUMO

IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL PARA DIFERENTES CONDIÇÕES RODOVIÁRIAS

AUTOR: Micael Dalpisol

ORIENTADOR: Deividi da Silva Pereira

Com o crescimento acelerado da urbanização, as questões ambientais causadas pelo transporte têm sido desafiadoras devido ao significativo impacto negativo nas mudanças climáticas. A temperatura média da Terra já aumentou cerca de 1,5°C desde o ano 1880 até os dias atuais e estima-se que até o ano de 2040 a temperatura possa aumentar mais 2°C. Para que isso não aconteça, estudos mostram que é necessária que as emissões atuais de CO₂ precisem diminuir cerca de 45%. Apesar das rigorosas normas de emissão e gases com efeito de estufa, o número de veículos usados aumentou significativamente, e conseqüentemente o consumo de combustível fóssil gerando aumento das emissões de CO₂ liberados para a atmosfera terrestre. Uma estimativa para quantificar o consumo de combustível por veículos é uma importante ferramenta para quantificar e detalhar as estratégias de controle das emissões de dióxido de carbono. Como, na última década, tem havido uma preocupação premente com as mudanças climáticas, os modelos de consumo de combustível dos veículos são cada vez mais significativos. Desta forma, este objeto de estudo, propõe, uma análise e exposição dos modelos de previsão de consumo de combustível relacionados às condições do pavimento nas rodovias. A pesquisa adota como metodologia, a pesquisa de revisão de literatura e também busca através de estatísticas e documentos governamentais, conceituar e dimensionar a necessidade do estudo.

Palavras-chaves: Consumo de combustível. Condição de rodovias. Emissões de CO₂. Combustíveis fósseis.

ABSTRACT

IDENTIFICATION AND EVALUATION OF FUEL CONSUMPTION PREDICTION MODELS FOR DIFFERENT ROAD CONDITIONS

AUTHOR: Micael Dalpisol

ADVISOR: Deividi da Silva Pereira

With the rapid growth of urbanization, the environmental issues caused by transportation have been challenging due to the significant negative impact on climate change. The earth's average temperature has risen by about 1.5°C from 1880 to the present day, and it is estimated that by the year 2040 the temperature could increase by another 2°C. For this not to happen, studies show that current CO₂ emissions need to be reduced by about 45%. Despite the strict emission standards and greenhouse gases, the number of vehicles used has increased significantly, and consequently the consumption of fossil fuel, generating an increase in CO₂ emissions released into the earth's atmosphere. An estimate to quantify the fuel consumption by vehicles is an important tool to quantify and detail strategies to control carbon dioxide emissions. As there has been a pressing concern over climate change in the last decade, vehicle fuel consumption models are increasingly significant. Thus, this object of study proposes an analysis and exposition of fuel consumption prediction models related to road sidewalk conditions. The research adopts as methodology, the literature review research and also seeks through statistics and governmental documents, to conceptualize and dimension the necessity of the study.

Keywords: Fuel consumption. Road's condition. CO₂ emissions. Fossil fuels.

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Modelo de consumo de combustível no HDM-4	47
Quadro 1 – Estimativa para o aumento da temperatura terrestre e absorção de CO2 liberado considerando	23
Quadro 2 – Tipos de unidades de potência e tipos de combustíveis	28
Quadro 3 – Classificações de condição dos pavimentos	35
Quadro 4 – Características de estudadas nos diferentes modelos VOC	43
Quadro 5 – Resultados dos testes realizados em cada estrada	49
Quadro 6 – Interação veículo pavimento nos diferentes segmentos avaliados	51
Quadro 7 – Diferença no consumo de combustível nos diferentes segmentos avaliados	51
Quadro 8 – Resumo de autores que estudaram o consumo de combustível frente ao IRI	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico energético mundial	15
Figura 2 – Ciclo do carbono	17
Figura 3 – Breve resumo do Efeito Estufa	21
Figura 4 – Emissões globais de CO ₂ e a temperatura global (1880 – 2019)	22
Figura 5 – Taxa de absorção das emoções de CO ₂	23
Figura 6 – Transporte utilizado em viagens em função da distância de viagem	27
Figura 7 – Mapa do percentual obrigatório de mistura de bioetanol na gasolina	30
Figura 8 – Mapa do percentual obrigatório de mistura de biodiesel no diesel fóssil	30
Figura 9 – Demanda anual de combustíveis no Brasil	31
Figura 10 – Demanda atual e previsão de combustível no setor de transporte	32
Figura 11 – Demanda atual e previsão do consumo de toneladas equivalentes de petróleo (TEP) no transporte de cargas (a) e passageiros (b)	32
Figura 12 – Demanda energética total do transporte de cargas e passageiros	33
Figura 13 – Irregularidades longitudinais consideradas no IRI	34
Figura 14 – Faixas de variação do IRI em diversas situações	36
Figura 15 – Força de atrito no movimento dos pneus	36
Figura 16 – Deflexões nos pavimentos	37
Figura 17 – Estrutura de um pavimento rígido	39
Figura 18 – Estrutura de um pavimento flexível	40
Figura 19 – Figura 19 – Comparação da economia de combustível entre pavimento rígidos e flexíveis	41
Figura 20 – Comparação da economia de no consumo de combustível entre pavimentos rígidos e flexíveis	53
Figura 21 – Consumo de combustível frente ao IRI para veículos pesados	54
Figura 22 – Consumo por velocidade de veículos rígidos (a) e articulados (b)	20

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Problemática	12
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.3	Justificativa	13
2	METODOLOGIA	14
3	COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E SUA UTILIZAÇÃO	15
4	EFEITO ESTUFA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS	20
5	O TRANSPORTE PELO MODAL RODOVIÁRIO	24
5.1	Veículos para o Transporte Rodoviário	27
5.2	Combustíveis para Veículos Rodoviários	28
5.3	Combustíveis para Veículos Rodoviários	31
6	FATORES CONDICIONANTES PARA O CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	34
6.1	Condição da Pista de Rolagem	34
6.2	Tipos de Pavimentos	38
6.4	Outros Fatores	41
7	MODELOS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	43
7.1	NIMPAC	44
7.2	HDM - 4	46
7.3	KO et al. (2010)	48
7.4	Ross (1980)	50
7.5	Thoresen (2004)	52
7.6	Outros Autores	54
8	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis são a fonte de energia dominante do mundo, representando 82% do fornecimento global de energia. O termo é usado para descrever um grupo de fontes de energia que foram formadas a partir de plantas e organismos antigos durante o Período Carbonífero, aproximadamente 286 – 360 milhões de anos atrás, antes da era dos dinossauros (STARKE, et. al., 2019).

Os países não membros da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) detêm a maioria das reservas comprovadas para todos os combustíveis fósseis. Essas fontes de energia alimentaram, e continuam a impulsionar, a industrialização das nações. Eles têm uma variedade de aplicações, desde a produção de eletricidade e o combustível para transporte até a produção de uma variedade de produtos comuns, como tintas, detergentes, polímeros (incluindo plásticos), cosméticos e alguns medicamentos (OLIVEIRA, et. al, 2021).

No Brasil, o transporte de passageiros e cargas é altamente dependente do modal rodoviário. Segundo o Relatório Executivo do Plano Nacional de Logística, (PNL 2025), cerca de 65% do transporte de carga, movimentando cerca de 1548 bilhões de toneladas por km, depende desse modal. Pode-se ver essa disparidade quanto ao contexto mundial quando se analisa outros países com territórios considerados de extensão continental. Nos Estados Unidos, o modal rodoviário abrange 43% do transporte de carga, no Canada 19%, na China 35%, na União Europeia 50% (ILOS, 2020).

Ao avaliar a qualidade do transporte rodoviário brasileiro, é notável o péssimo desempenho do país (DE ALMEIDA MOREIRA et al. 2019). No Brasil, aproximadamente 12% de toda a malha rodoviária é pavimentada (CNT, 2023). Já nos Estados Unidos, cerca de 58% da malha rodoviária é pavimentada. Aspectos como a baixa qualidade e má conservação das vias pavimentadas, falta de manutenção, má fiscalização e a elevada idade média da frota de veículos rodoviários do país (cerca de 15 anos) contribuem ainda mais para o péssimo desempenho do modal rodoviário no país (BARTHOLOMEU, CAIXETA FILHO, 2018).

A total malha rodoviária brasileira possui cerca de 1,7 milhões de quilômetros e apenas 213 mil quilômetros são pavimentadas (CNT, 2023). Considerando a parcela pavimentada, cerca de 25% das rodovias encontram-se em condições de tráfego consideradas com “Ruim” e “Péssima” (CNT, 2022).

A má conservação das rodovias impacta de forma negativa no consumo de combustível dos veículos que as utilizam. Sendo assim, gasta-se mais combustível para percorrer

menores distancias aumentando o custo do deslocamento e gerando maior liberação de gases decorrentes da combustão.

Além de maiores gastos com combustível, a economia é prejudicada, atrasando o desenvolvimento de regiões e gerando custos com reformas e reconstru es de pavimentos em m s condi es (BARTHOLOMEU, CAIXETA FILHO, 2018). No Brasil isso é evidenciado pelas regiões Norte e Nordeste, detentores das piores condi es de malha rodoviária do país e que conseqentemente apresentam o menor IDE ( ndice de Desenvolvimento Econ mico) e PIB (Produto Interno Bruto) (CNT, 2021).

Os combustíveis fósseis são recursos não renováveis, pois levaram milhões de anos para se formar. Uma vez que esses recursos são usados, eles não serão reabastecidos. Além disso, os combustíveis fósseis são a maior fonte de dióxido de carbono, um gás com efeito de estufa que contribui para as altera es climáticas, e a sua produ o causa impactos ambientais e na saúde humana (DE LIMA, et. al., 2022).

Mesmo já consolidado há bastante tempo, o modal rodoviário ainda está evoluindo sua matriz energética.   notável o incentivo político e público em todos os países para a redu o de consumo de combustíveis fóssil e para a redu o da libera o de gases poluentes na atmosfera (SATO, et al., 2022). Sendo assim, a busca por energias renováveis ganha destaque internacional. Contudo, ainda assim, 80% do modal rodoviário brasileiro abrange a utiliza o de combustíveis fósseis como matriz energética (EPE, 2022).

Levando em conta as m s condi es viárias brasileiras e a dependência do modal rodoviário dos combustíveis fósseis, verifica-se que o setor, é um dos maiores emissores de CO₂ no Brasil (TAYRA; DOS REIS, 2020). De toda a emissão de CO₂ do Brasil, o setor de transporte abrange 40% das emissões, sobre esse montante está o modal rodoviário com 90% das emissões. Ou seja, 36% de toda a emissão de CO₂ do Brasil compreende o transporte rodoviário (CNT, 2019).

Dessa forma, diante do contexto apresentado, é importante buscar compreender os fatores que afetam o consumo de combustível, dentre os quais está a condi o do pavimento das rodovias. Para isso o trabalho buscou realizar uma revisão bibliográfica em busca de modelos que correlacionam esses dois fatores.

1.1 Problemática

  possível avaliar os diferentes tipos de modelos de consumo de combustível decorrente da condi o da pista de rolagem?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Expor modelos de previsão de consumo de combustível por veículos durante o tráfego em rodovias com diferentes condições de conservação rodoviária na pista de rolagem.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar modelos disponíveis na literatura de previsão de consumo de combustível de veículos a partir da condição da pista de rolagem de rodovias;
- b) Apresentar os modelos expondo seus métodos
- c) Analisar os diferentes modelos obtidos;

1.3 Justificativa

A concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera tem aumentado significativamente devido ao aumento da frota de veículos e ao uso excessivo de combustíveis fósseis, contribuindo para o aumento e a intensificação do efeito estufa na Terra. Segundo o relatório mais recente do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC 2021) da ONU, o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera é a principal causa do aquecimento global observado nas últimas décadas.

De acordo com ainda com o IPCC (2021), o aumento da temperatura média global desde a era pré-industrial já é de cerca de 1,1°C, e estima-se que este valor chegue a 1,5°C entre 2030 e 2052, caso as emissões de gases de efeito estufa não sejam reduzidas significativamente.

Desta forma, este objeto de estudo, justifica-se, pois contribui com análises e exposições de modelos de previsão de consumo de combustível de veículos durante o tráfego em rodovias com diferentes condições de conservação rodoviária na pista de rolagem, contribuindo para estudos futuros relacionados com impacto ambiental da má conservação dos pavimentos frente a emissão de CO₂, por exemplo.

2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada foi a de revisão de literatura de caráter descritivo e exploratório. Segundo Sousa et al. (2007) a pesquisa exploratória adota uma estratégia sistemática com vias de gerar e refinar o conhecimento quantificando relações entre variáveis. A adoção do modelo buscou compreender como a condição dos pavimentos rodoviários afeta no aumento do consumo de combustível nos veículos.

A revisão bibliográfica é uma ferramenta essencial para a compreensão de uma ampla gama de conhecimentos e entendimentos sobre um determinado assunto. É por meio dela que a pesquisa pode observar o que vários autores têm a dizer sobre o tema em questão. Além disso, essa revisão permite a síntese dos achados científicos, que são a base para a aplicabilidade prática (SOUZA et al., 2010).

A pesquisa bibliográfica é a pesquisa realizada por meio de levantamentos teóricos em material já publicado sobre o tema estudado. Segundo Gil (2002, p. 72-73), os métodos da pesquisa bibliográfica podem ser definidos através dos seguintes passos: “a) determinar os objetivos; b) elaborar um plano de trabalho; c) identificar as fontes; localizar as fontes e obter o material; d) ler o material; fazer apontamentos; e) confeccionar fichas; e f) redigir o trabalho”.

Fonseca (2002, p. 32) diz que a pesquisa bibliográfica é aquela que permite ao pesquisador compreender estudos anteriores sobre o tema estudado que tem como base na pesquisa bibliográfica, buscando referências teóricas “publicadas com o objetivo de recolher informações ou conhecimentos prévios sobre o problema a respeito do qual se procura a resposta”.

Este trabalho de revisão bibliográfica foi efetuado por meio da pesquisa em livros, artigos, revistas, periódicos nas seguintes bases de dados, Google Acadêmico, SciELO, Periódico Capes, Scopus e sites especializados que tratam o tema afim de encontrar publicações que abordaram temas como consumo de combustíveis fósseis, emissões de CO₂, efeito estufa, qualidade de pavimentos, variação no consumo de combustível, ações que aumentam o consumo de combustível, tipos de pavimentos, relação entre a conservação do pavimento e o consumo combustível, índices de irregularidades do pavimento, entre outros.

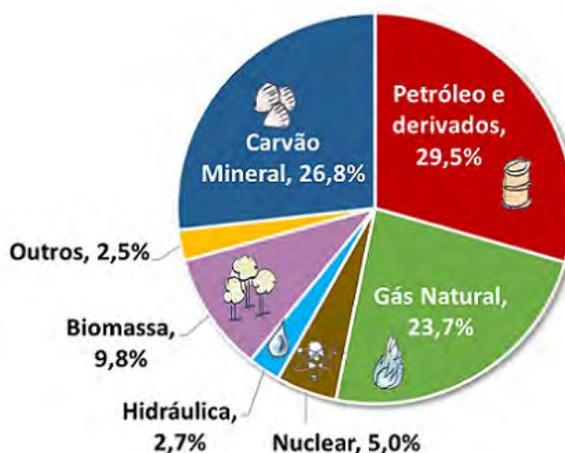
3 COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E SUA UTILIZAÇÃO

Energia é definida como capacidade de realizar trabalho ou produzir uma ação (HALLIDAY, 2009). A civilização moderna só é possível porque as pessoas aprenderam a mudar a energia de uma forma para outra e depois usá-la para fazer o trabalho. As pessoas usam energia para caminhar e andar de bicicleta, para mover carros ao longo de estradas e barcos através da água, para cozinhar alimentos em fogões, para fazer gelo em freezers, para iluminar nossas casas e escritórios, para fabricar produtos e diversas outras atividades. A energia pode ser convertida de uma forma para outra. Por exemplo, o alimento que se come contém energia química, e o corpo humano armazena essa energia até que você a use como energia cinética durante qualquer atividade diária. (SCHAPPO, et. al., 2021).

Existem muitas formas de energia como: calor, luz, movimento, elétrico, químico, gravitacional, além das energias em potencial (armazenada) e a energia cinética (ou de trabalho). Considerando as fontes de energia que os humanos utilizam para facilitar as atividades do dia-a-dia, existem inúmeras fontes que podemos utilizar, mas todas elas podem ser divididas em duas categorias: fontes de energia renováveis e fontes de energia não renováveis. As fontes de energia renováveis e não renováveis podem ser utilizadas como fontes de energia primária para produzir energia útil, como o calor, ou podem ser utilizadas para produzir fontes de energia secundárias, como a eletricidade (GASPARIN, 2022; Da Silva et. al., 2021).

Para tudo que se faz, precisa-se de energia. A energia que utilizamos no dia-a-dia é derivada de um conjunto de fontes que se denomina matriz energética. A seguir, na Figura 1, é possível notar as disposições das matrizes energéticas no mundo inteiro.

Figura 1 – Gráfico energético mundial



Fonte: EPE (2022) – adaptado pelo autor

Como exposto anteriormente, podemos dividir as fontes de energia de uma matriz energética em dois tipos: fontes de energias renováveis e fontes de energia não-renováveis. As fontes de energia não-renováveis são fontes que utilizam recursos limitados na natureza e sua exploração acarreta prejuízos para o meio ambiente. Dentre elas, podemos mencionar o carvão, petróleo, gás natural, nuclear, entre outras. Já as fontes de energias renováveis são aquelas que utilizam recursos ilimitados na natureza e que não acarretam prejuízos ao meio ambiente, como energia eólica, solar e hidráulica. Visando isso, e ainda analisando a Figura 1, podemos ver que dentre as diversas alternativas possíveis o uso das fontes energéticas não-renováveis são cerca de 85% (carvão mineral, petróleo e derivados, gás natural e nuclear) de todas as fontes energéticas mundiais (EPE, 2022).

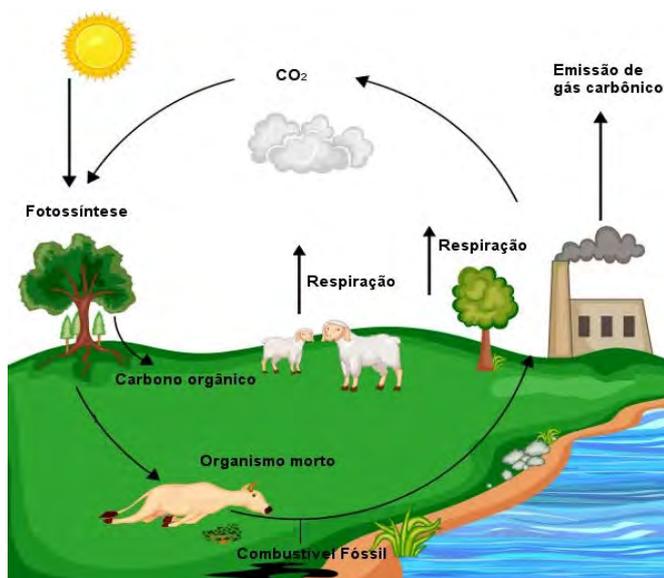
3.1 Origem, características, aplicações e efeitos combustíveis fósseis

Os seres humanos precisam de energia para praticamente qualquer tipo de função que desempenham. As casas devem ser aquecidas, a energia é necessária para a indústria e a agricultura e, mesmo dentro de nossos próprios corpos, ocorre um fluxo constante de energia (STARKE, et. al., 2019).

Todos os luxos e facilidades no dia-a-dia da população, exigem de energia. Sendo assim, atualmente, a vida sem o processo geração de energia é inviável. Este é um processo industrial que pode ser realizado usando várias fontes diferentes. Essas fontes podem ser renováveis ou não renováveis. As fontes de energia renováveis são substituídas ao longo do tempo e, por conseguinte, não se esgotam facilmente. No entanto, as fontes de energia não renováveis ameaçam esgotar-se se o nosso nível de utilização se tornar demasiado elevado (OLIVEIRA, et. al., 2021).

Hoje em dia, muitas fontes de energia renováveis estão disponíveis para uso, por exemplo, energia solar, eólica e energia hídrica. Ironicamente, ainda obtemos a maior parte da energia que utilizamos de fontes não renováveis, comumente conhecidas como combustíveis fósseis oriundos do ciclo do carbono (Figura 2). A não renovação dessas fontes provavelmente fará com que os preços subam até um ponto em que não sejam mais economicamente viáveis (STARKE, et. al., 2019).

Figura 2 – Ciclo do Carbono



Fonte: (SANTOS, Vanessa Sardinha dos 2023) – adaptado pelo autor

Os combustíveis fósseis consistem em depósitos de organismos, outrora vivos, decompostos, gerando matéria orgânica que leva séculos para se formar. Eles consistem principalmente em ligações de carbono e hidrogênio dando origem a três tipos de combustíveis que podem ser utilizados para o fornecimento de energia: carvão, petróleo e gás natural (DE SOUZA BATISTA; DE OLIVEIRA CHAVES, 2021).

Segundo Tayra e Dos Reis (2020), o carvão é um combustível fóssil sólido formado ao longo de milhões de anos pela decomposição da vegetação terrestre. Quando as camadas são compactadas e aquecidas ao longo do tempo, os depósitos são transformados em carvão. O carvão é bastante abundante em comparação com os outros dois combustíveis fósseis.

Geralmente extraído de minas, o carvão teve seu consumo dobrado desde o início do século 20. Contudo, desde o ano de 1996 o seu uso está caindo. Muitos países em desenvolvimento dependem do carvão para o fornecimento de energia pois não possuem acesso em larga escala de outro tipo de combustível. A China e a Índia são os principais utilizadores de carvão para o fornecimento de energia (FERREIRA; VIEIRA FILHO, 2019).

O petróleo é um combustível fóssil líquido que é formado a partir de milhares de anos de decomposição de microrganismos, especialmente marinhos, depositados no assoalho oceânico, fundo de mares ou lagos (REIS, 2019). Esses microrganismos decompostos, acabam confinados sob alta pressão nas camadas mais profundas do globo podendo extraído por plataformas de perfuração tanto em alto mar quanto em terra firme.

O petróleo bruto consiste em muitos compostos orgânicos diferentes que são transformados em vários produtos em um processo de refino. Estes produtos são utilizados como combustível de veículos, em estradas, plásticos e muitas outras aplicações, e por isso é o combustível fóssil mais utilizado (ALMEIDA, 2020). Por não ser encontrado em todos os lugares da terra, o petróleo é um combustível valioso e tem sido motivos de diversas discussões políticas e até mesmo guerras (REIS, 2019).

O gás natural é um combustível fóssil gasoso que é versátil, abundante e relativamente limpo em comparação com o carvão e o petróleo (ALMEIDA, 2020). Assim como o petróleo, é formado pela decomposição de micro-organismos marinhos, mais especificamente pela liberação de gases dessa decomposição (FERREIRA; VIEIRA FILHO, 2019). Em países desenvolvidos, o uso do gás natural já ultrapassou o uso do carvão.

Constituído principalmente em metano (CH_4), o gás natural é comprimido em pequenos volumes em grandes profundidades na terra e, assim como o petróleo, é trazido à superfície por perfuração. (DE ALMEIDA, 2019). Contudo, diferentemente do petróleo, as reservas de gás natural são distribuídas de forma mais uniforme em todo o mundo (FERREIRA; VIEIRA FILHO, 2019).

Historicamente, os combustíveis fósseis estavam disponíveis em abundância de suprimentos que eram fáceis de obter e transportar. Mas agora são dados sinais de que a oferta está se esgotando e que levará séculos para ser reabastecida. Tanto as fontes (camadas mais profundas do planeta) quanto os sumidouros (absorvente dos resíduos da combustão: água e ar por exemplo) de combustíveis fósseis são limitantes em seu uso (ALMEIDA, 2020).

A queima de combustíveis fósseis é responsável por questões ambientais que estão no topo da agenda política nos dias de hoje. Exemplos disso são a acumulação de gases do efeito estufa, a acidificação, a poluição atmosférica, a poluição da água, os danos causados à superfície do solo e ao ozono topoférico (REIS, 2019).

Atualmente, a queima de petróleo é responsável por cerca de 30% de todas as emissões de dióxido de carbono para o ar. O gás natural não libera tanto dióxido de carbono pois sua estrutura química é formada pelo metano (CH_4). As maiores emissões são causadas pela combustão do carvão que muitas vezes são resultado de incêndios subterrâneos que são virtualmente impossíveis de extinguir. Contudo o petróleo vem aumentando as emissões gradativamente pelo uso dos veículos que, em sua maioria, dependem dele para seu funcionamento (DE OLIVEIRA; JUNGER, 2020).

Justifica-se o uso dos combustíveis fósseis pelo seu baixo preço comparado a qualquer alternativa conhecida no momento. Contudo, alguns cientistas e ambientalistas preveem um aumento considerável dos custos dos combustíveis fósseis no próximo século devido a sua escassez. De acordo com Bjorn Lomborg, devido a isso, a eventual troca para as fontes de energias renováveis acabará acontecendo como através do movimento de eletrificação dos veículos que já vem ocorrendo, atualmente com maiores nos países da União Europeia.

4 EFEITO ESTUFA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O cientista sueco Svante Arrhenius (1859-1927) foi o primeiro a afirmar, em 1896, que a combustão de combustíveis fósseis pode eventualmente resultar em um aumento do efeito estufa (WIEDERKEHR, 2019). Ele propôs uma relação entre as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono e a temperatura e descobriu que a temperatura média da superfície da Terra é de cerca de 15°C devido à capacidade de absorção infravermelha do vapor de água e dióxido de carbono. Isso é chamado de efeito estufa natural (JUNIOR, 2021).

Arrhenius propôs que ao dobrar a concentração de CO₂ na atmosfera, levaria a um aumento da temperatura em 5°C. Ele e Thomas Chamberlin calcularam que as atividades humanas poderiam aquecer a Terra adicionando dióxido de carbono à atmosfera. Esta pesquisa foi um subproduto da pesquisa sobre o dióxido de carbono explicar as causas da grande Idade do Gelo. Isso não foi realmente verificado até 1987 (MOLION, 2021).

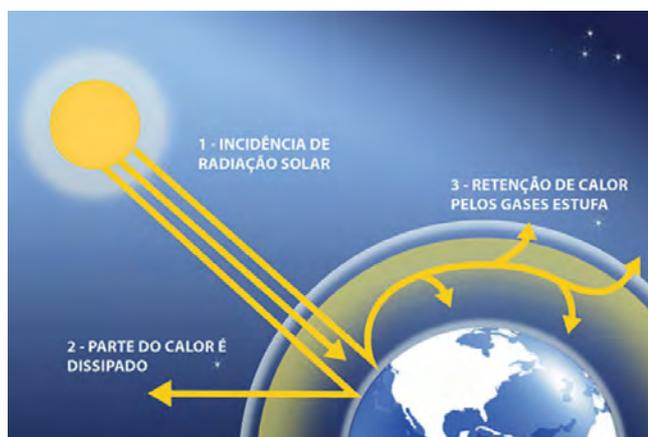
Após as descobertas de Arrhenius e Chamberlin, o tema foi esquecido por muito tempo. Naquela época, pensava-se que as influências humanas eram insignificantes em comparação com as forças naturais, como a atividade solar e a circulação oceânica. Acreditava-se também que os oceanos eram sumidouros de carbono tão grandes que cancelariam automaticamente a nossa poluição e, além disso, que o vapor de água, visto como um gás, era muito mais influente ao efeito estufa (JUNGES, 2019).

Na década de 1940, houve desenvolvimentos na espectroscopia infravermelha para medir a radiação de ondas longas (WIEDERKEHR, 2019). Naquela época, foi provado que o aumento da quantidade de dióxido de carbono atmosférico resultou em mais absorção de radiação infravermelha (DO NASCIMENTO et. al., 2020). Descobriu-se também que os tipos de radiação absorvidas pelas moléculas de vapor d'água são diferentes das radiações absorvidas pelas moléculas de dióxido de carbono. Gilbert Plass resumiu esses resultados em 1955. Ele concluiu que a adição de mais dióxido de carbono na atmosfera interceptaria a radiação infravermelha que, de outra forma, seria perdida para o espaço, aquecendo a Terra (JUNIOR, 2021).

Resumidamente, o efeito estufa é um fenômeno natural que ocorre na atmosfera da Terra, no qual certos gases (como dióxido de carbono) retêm parte da energia térmica do Sol (radiação solar), impedindo que ela escape para o espaço. Esse processo mantém a temperatura média do planeta em um nível adequado para a vida, mas quando a concentração desses gases aumenta, seja por causas naturais ou atividades humanas (como a queima de combustíveis fósseis), o efeito estufa se intensifica e a temperatura da Terra tende a subir, o que pode ter consequências negativas para o clima e o meio ambiente. Além

disso, o processo é intensificado pela destruição da camada de ozônio que ocorre quando o CO_2 (dióxido de carbono) liberado em excesso, reage com o O_3 (gás ozônio) formando O_2 (oxigênio). A seguir na Figura 3 podemos analisar de maneira geral como o efeito estufa age sobre o planeta.

Figura 3 – Breve resumo do Efeito Estufa



Fonte: (ABROBIO – Associação dos Produtores de Biocombustíveis do Brasil) – adaptado pelo autor

O argumento de que os oceanos absorveriam a maior parte do dióxido de carbono ainda estava intacto (MOLION, 2021). No entanto, na década de 1950, foram encontradas evidências de que o dióxido de carbono tem uma vida útil atmosférica de aproximadamente 10 anos (JUNGES, 2019). Além disso, ainda não se sabia o que aconteceria com uma molécula de dióxido de carbono depois que ela acabasse por se dissolver no oceano (CANEPPELE, 2019).

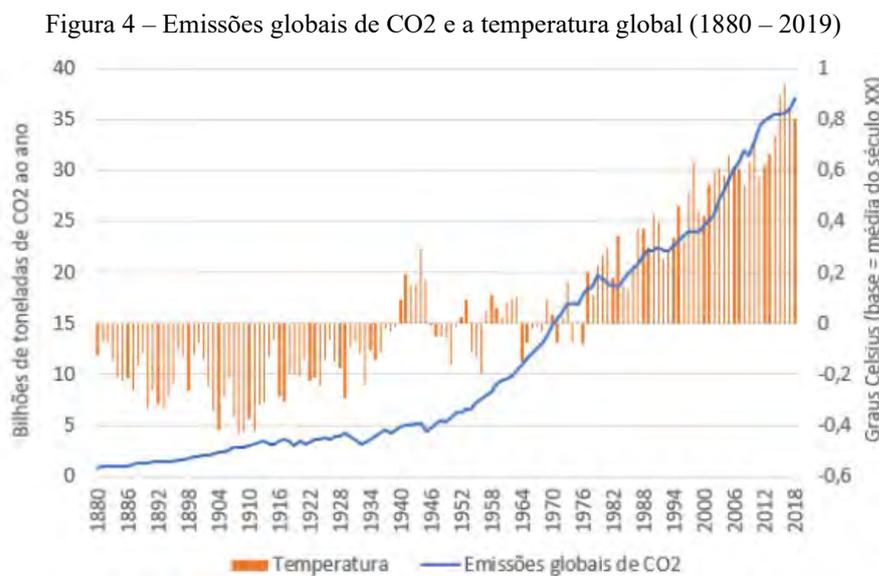
No final da década de 1950 e início da década de 1960, Charles Keeling usou as mais modernas tecnologias disponíveis para produzir curvas de concentração para CO_2 atmosférico na Antártida e Mauna Loa (JUNGES, 2019). Essas curvas se tornaram um dos principais ícones do aquecimento global. As curvas mostraram uma tendência de queda da temperatura anual global da década de 1940 à década de 1970 dando a entender que uma nova era glacial pudesse estar próxima. (MOLION, 2021).

Na década de 1980, finalmente, a curva de temperatura média anual global começou a subir. As pessoas começaram a questionar a teoria de uma nova era glacial que se aproximava. No final da década de 1980, a curva começou a aumentar tão acentuadamente que a teoria do aquecimento global começou a ganhar terreno rapidamente (MARQUES, et. al., 2022).

As ONGs Ambientais (Organizações Não-Governamentais) começaram a defender a proteção ambiental global para evitar mais aquecimento global. A imprensa também ganhou interesse no aquecimento global e logo se tornou um tópico de notícias que se repetiu em

escala global. Em paralelo a isso, Stephen Schneider havia previsto pela primeira vez o aquecimento global em 1976. Isso fez dele um dos principais especialistas em aquecimento global do mundo (MARQUES, et. al., 2022).

Em 1988, reconheceu-se finalmente que o clima era mais quente do que qualquer período desde 1880 (CANEPPELE, 2019). Na Figura 4 podemos ver um gráfico correlacionando a emissões de CO₂ com o aumento da temperatura global. A teoria do efeito estufa foi nomeada e o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*) foi fundado pelo Programa Ambiental das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) (MOLION, 2021). Esta organização tenta prever o impacto do efeito estufa de acordo com os modelos climáticos existentes e informações da literatura (CORNETTA, 2022).



Fonte: (GCP – Global Carbon Project) – adaptado pelo autor

O Painel é composto por mais de 2.500 especialistas científicos e técnicos de mais de 60 países em todo o mundo. Os cientistas são de campos de pesquisa amplamente distintos, incluindo climatologia, ecologia, economia, medicina e oceanografia. O IPCC é referido como o maior projeto de cooperação científica revisado por pares da história divulgando relatórios estatísticos sobre a perspectivas climáticas para o futuro para possíveis intervenções ambientais. Ele realiza publicações estatísticas gerais anuais, sendo as últimas publicações nos anos de 2021 e 2022. Essas publicações serão utilizadas na elaboração do relatório final do sexto ciclo de avaliação, com previsão de lançamento em 2023, sucedendo o relatório anterior publicado em 2014 (WIEDERKEHR, 2019; MARQUES, et. al., 2022).

Com base na publicação do IPCC 2021, são considerados 5 cenários para a proporção de emissões de CO₂ expostas no Quadro 1. Sendo considerados o cenário SSP1-1.9 o melhor deles, com baixas emissões de CO₂, e o cenário SSP5-8.5 o pior deles, com altas emissões de CO₂. Podemos ver também a estimativa de aumento da temperatura terrestre para as propostas de cada cenário. Além disso, na Figura 5, é possível comparar a taxa de absorção do CO₂ pela continente e oceano para cada cenário.

Quadro 1 – Estimativa para o aumento da temperatura terrestre e absorção de CO₂ liberado considerando diferentes cenários.

Cenário	Curto prazo, 2021–2040		Médio prazo, 2041–2060		Longo prazo, 2081–2100	
	Melhor estimativa (°C)	Faixa Muito provável (°C)	Melhor estimativa (°C)	Faixa Muito provável (°C)	Melhor estimativa (°C)	Faixa Muito provável (°C)
SSP1-1.9	1,5	1,2 a 1,7	1,6	1,2 a 2,0	1,4	1,0 a 1,8
SSP1-2.6	1,5	1,2 a 1,8	1,7	1,3 a 2,2	1,8	1,3 a 2,4
SSP2-4.5	1,5	1,2 a 1,8	2,0	1,6 a 2,5	2,7	2,1 a 3,5
SSP3-7.0	1,5	1,2 a 1,8	2,1	1,7 a 2,6	3,6	2,8 a 4,6
SSP5-8.5	1,6	1,3 a 1,9	2,4	1,9 a 3,0	4,4	3,3 a 5,7

Fonte: (IPCC, Mudança do Clima 2021, A Base Científica – Sumário para Formuladores de Políticas) – adaptado pelo autor

Figura 5 – Taxa de absorção das emissões de CO₂.



Fonte: (IPCC, Mudança do Clima 2021, A Base Científica – Sumário para Formuladores de Políticas) – adaptado pelo autor

Os dados das últimas estatísticas publicadas pelo IPCC em 2022, foram o foco da COP-27 (27ª Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas) trazendo temas dos impactos no clima, adaptação e vulnerabilidade. De acordo com a publicação do IPCC, para meta estabelecida do último relatório de controlar o aumento da temperatura em 1,5°C do planeta até 2050, é necessário que as emissões atuais de CO₂ diminuam em 45% até 2030. Sendo assim, esperasse que os investimentos para a redução da emissão de CO₂ sejam duplicados acelerando o processo.

5 O TRANSPORTE PELO MODAL RODOVIÁRIO

A história do transporte rodoviário começa com a introdução da roda e sua subsequente aplicação ao movimento de mercadorias (VIEIRA, et. al., 2022). Os mineiros de cobre na Europa Central por volta de 4000-5000 aC podem ter sido os primeiros a aplicá-lo, no transporte de minério do interior da mina para um local mais conveniente para o trabalho (ARASHIRO, et. al., 2022). No entanto, a difusão da roda era lenta e esporádica e o transporte terrestre dependia principalmente do esforço humano ou de animais de carga por longos períodos. Algum tempo depois, a invenção de rodas giratórias independentes em um eixo fixo tornou possíveis eixos dianteiros dirigíveis e estimulou o uso de carruagens militares (PENTEADO, 2021).

Foi o tamanho e a complexidade econômica do Império Romano em expansão, juntamente com a necessidade de mover rapidamente as tropas, que geraram uma demanda por um sistema de transporte para mover grandes volumes de mercadorias e pessoas por longas distâncias há mais de 2000 anos (SCHYRA, 2019). Extensas redes rodoviárias duráveis foram construídas e uma variedade de veículos puxados por animais evoluiu, com vagões pesados de quatro rodas para mercadorias e veículos de duas rodas mais leves capazes de atender à demanda por movimento rápido em todo o sistema. A organização Romana era tamanha de forma que possuíam planos e regras para realizar manutenções das estradas (MORAES, et. al., 2020).

As estradas romanas caíram em desuso e os veículos de rodas mais ou menos desapareceram em toda a Europa até que começaram a fazer um retorno lento quase mil anos depois, durante a Idade Média (PENTEADO, 2021). O retorno lento foi ganhando velocidade até que o movimento de mercadorias e pessoas cresceu de tal maneira que as estradas existentes eram insuficientes para atender a demanda da população. O comércio entre as cidades estava aumentando e o movimento pela navegação costeira era muito lento e pouco confiável (SCHYRA, 2019).

A disseminação de estradas privadas com portagem (pedágios) e a construção da rede gerida pelo Estado, juntamente com um serviço postal em expansão, andaram juntas com um rápido crescimento do transporte rodoviário durante o século XVIII. No início do século XIX, as tecnologias convergentes de construção de estradas e motores à vapor leves de alta pressão estimularam a introdução de veículos rodoviários motorizados (PENTEADO, 2021). No Reino Unido e, em muito menor grau, na França, uma série de serviços interurbanos e locais começaram durante a década de 1830. Alguns operavam serviços

regulares confiáveis que transportavam dezoito passageiros a velocidades médias de até 25 km por hora (ARASHIRO, et. al., 2022).

A evolução dos automóveis com o motor de combustão interna de alta velocidade, com uma relação potência/peso muito superior as tecnologias existentes, apareceu na década de 1860. Com combustível líquido, uso de automóveis teve um grande aumento na década de 1880, passando a ser um dos meios mais comuns para o transporte de passageiros e o transporte de carga. Assim como a tecnologia dos automóveis aumentava em ritmo acelerado, os pavimentos evoluíram com estruturas melhores e mais regulares para atender a demanda do uso dos automóveis (MORAES, et. al., 2020).

As estradas são um tipo de transporte crucial em todo mundo. Elas fornecem às pessoas um meio para se deslocar com veículos para uma ampla gama de locais e ajudá-los a chegar ao seu destino. Embora o transporte marítimo, aéreo ou ferroviário sejam soluções para o transporte amplamente utilizadas, o transporte rodoviário é o mais utilizado tanto para o transporte de passageiros quanto para o transporte de carga devido a sua elevada velocidade e mobilidade (JACINTO, et. al., 2022).

Com a evolução da indústria e a necessidade de transportar suas mercadorias para os mais diversos locais do globo o crescimento de muitas empresas de serviços de entrega de carga no mundo gerou uma demanda pela procura de um modo de transporte que melhor se adequaria às suas necessidades. É importante entender a distância, o volume de entrega de mercadorias e a velocidade de serviço para decidir qual modelo preferir. Verificado o contexto, o transporte rodoviário é o mais utilizado de todos os serviços de transporte disponíveis na indústria, com os melhores serviços de entrega, mobilidade e velocidade. Mesmo ao utilizar os outros modais de transporte, aéreo, aquático, ferroviário ou dutoviário, para o transporte de mercadorias ou matéria prima de um país para outro, por exemplo, o destino final, normalmente é utilizado o transporte rodoviário (SANTANA, et. al., 2021).

Jarrouge, et. al., (2022), menciona que o transporte rodoviário é uma maneira extremamente eficiente de transportar mercadorias de e para vários locais, a fim de melhorar a eficiência e o crescimento dos negócios. Existem inúmeras indústrias que exigem que suas mercadorias sejam transportadas com segurança, e o transporte rodoviário de mercadorias é considerado a melhor maneira de fazer isso. Além disso, a relação custo-eficácia, uma vez que é significativamente mais barato transportar mercadorias através de um veículo (NEGRELLO, 2022). Isso ocorre por causa dos custos de embalagem, a despesa real de carga, descarga e manuseio é barata em comparação com outras formas de transporte. Vale considerar que para matérias prima com baixo valor agregado, elevado peso e grande

volume, como minérios por exemplo, um estudo mais adequado deve ser realizado visando os tipos de transporte disponíveis no local além das distâncias percorridas pela mercadoria.

Atualmente, o transporte rodoviário é o único sistema extensivo que dá transporte até o destino final. Indústrias de mercadorias podem fornecer um serviço porta a porta, oferecendo aos seus clientes uma experiência de entrega personalizada. Isso beneficia a empresa e o consumidor final pois não há necessidade de coletá-lo de outro local, o que geralmente dispensa uma quantidade considerável de despesas (JACINTO, et. al., 2022).

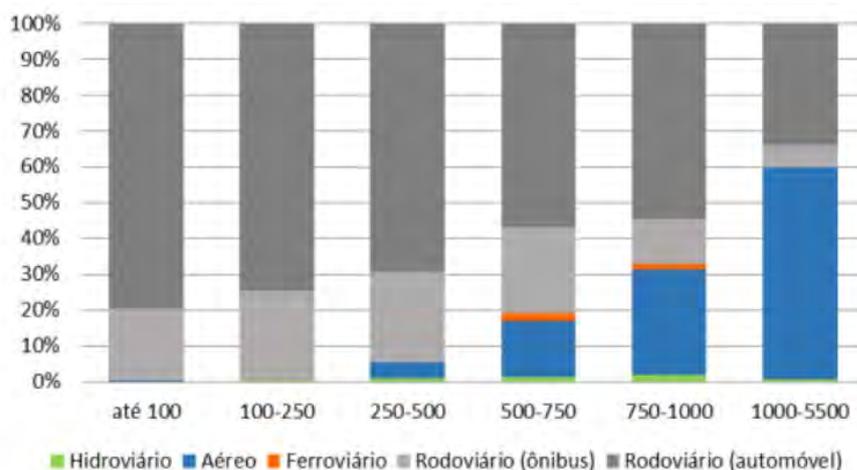
Quando comparado aos transportes ferroviário, aéreo, aquaviário e dutoviário, onde é necessário fazer diversas realocações do produto passando por verificações e até mesmo passar por outro modo de transporte para chegar no destino final, é notável a facilidade e mobilidade de transporte rodoviário. Diferentemente do modal rodoviário, os outros modais possuem limitações e não chegam em á qualquer lugar. Com o transporte rodoviário, pode-se simplesmente carregar os itens do seu lugar, dirigir e descarregá-lo diretamente no destino desejado nos mais diversos pontos do globo terrestre. Além disso, o transporte rodoviário proporciona uma flexibilidade substancial, uma vez que os prazos de entrega e as rotas podem ser facilmente adaptados para atender aos requisitos do fornecedor ou do cliente. As estradas também são a única rota de transporte generalizada, o que significa que os motoristas podem optar por tomar várias opções de rota, dependendo das restrições de tempo e dos requisitos adicionais do cliente (SANTANA, et. al., 2021; JARROUGE, et. al., 2022).

Existem muitas vantagens para os serviços de transporte rodoviário quando comparados com outros modos de transporte. Quando se analisa o capital necessário para o transporte rodoviário, é muito menor do que os outros meios de transporte, como ar, água ou ferrovia. Mesmo sendo um serviço extremamente caro, a taxa de construção, manutenção e exploração de estradas é muito menor. Pode-se citar também a manutenção dos equipamentos empregados na realização do transporte. A manutenção de um carro é consideravelmente mais barata do que a manutenção de um avião por exemplo (LOPES, 2022).

Considerando o transporte de passageiros, as rodovias ganham destaque pela sua flexibilidade, agilidade e velocidade. Ao comparar a velocidade de um avião com a de um carro, a disparidade frente a isso é muito elevada. O avião é cerca de 15 vezes mais veloz que a do carro. Contudo muitas vezes o tempo levado para chegar no destino final com o carro, dependendo da distância, é mais rápido do que o de avião considerado toda a logística envolvida. Na Figura 6 é possível conferir a distribuição do modal no transporte de pessoas

considerando a distância de viagem. No que é possível analisar, verifica-se uma tendência à mudança do transporte rodoviário de pessoas para o transporte aéreo em viagens com maiores distâncias.

Figura 6 – Transporte utilizado em viagens em função da distância de viagem.



Fonte: EPE (2022) – adaptado pelo autor

5.1 Veículos Para O Transporte Rodoviário

Ao selecionar os veículos, os gestores de transportes devem ter em conta tanto o tipo de motor como os combustíveis disponíveis. A escolha do tipo de combustível é uma característica do processo de seleção de veículos, mas, pelo menos no caso de veículos comerciais, é provavelmente tomada como tendo em conta que a resposta será o diesel. Isso pode muito bem estar certo, mas, no entanto, esta é uma questão que merece mais do que apenas um olhar superficial.

Embora o processo de seleção seja muitas vezes pensado como uma escolha de combustível, é realmente uma escolha do tipo de unidade de potência (motor), pois é isso que governa o combustível que pode ser usado. Além disso, uma decisão baseada apenas nos méritos relativos de diferentes combustíveis ignorará alguns fatores importantes que podem ter maior peso. Então, essa parte do processo de seleção de veículos realmente precisa ser executada em linhas paralelas: uma envolvendo as características de diferentes tipos de motores; uma envolvendo os diferentes tipos de combustível; e outros fatores envolvendo custo e valores do mercado atual, consumo dos motores, manutenção, vida útil dos motores entre outros (CARMONA; KASSAI, 2019).

O Quadro 2 abaixo mostra duas colunas, uma detalhando os tipos disponíveis de unidade de potência (motor), a outra os vários combustíveis disponíveis atualmente. Deve-se notar que não há necessariamente uma correlação direta entre a unidade de potência na primeira coluna e o combustível na segunda.

Quadro 2 – Tipos de Unidades de Potência e Tipos de Combustíveis

Tipos de Unidades de Potência	Tipos de Combustíveis
Ignição por faísca	Gasolina
Ignição por compressão	Diesel
Motor elétrico	Gás natural (GNC ou GNV)
Híbrido	Gás liquefeito de petróleo (GLP)
Turbina a gás	Eletricidade
	Querosene

Fonte: EPE (2022) – adaptado pelo autor

Ignição por faísca é um tipo de motor que comprime uma mistura de combustível e ar no cilindro e, através de um faísca elétrica no momento exato, inflama essa mistura para produzir a combustão. O resultado é uma combustão que aumenta a pressão no cilindro empurrando pistões fazendo girar um virabrequim. Por outro lado, a ignição por compressão é similar à ignição por faísca, mas apenas o ar é comprimido no cilindro. A combustão é iniciada injetando um spray fino de combustível no ar comprimido que, ao entrar em contato com o ar sob pressão, inflama instantaneamente. A pressão gerada no cilindro é muito maior do que nos motores de ignição por faísca, gerando mais torque, contudo, o custo e a manutenção desses motores são maiores.

Já o motor elétrico, embora apresente diversas vantagens, tais como sua baixa emissão de ruídos, ausência de poluentes e baixa necessidade de manutenção, é importante ressaltar que sua operação depende do uso de uma bateria pesada e bastante custosa, o que pode representar um desafio para sua adoção em larga escala. O motor híbrido combina um motor de ignição por faísca ou compressão com um motor elétrico e pode trabalhar de várias maneiras para maximizar a eficiência energética e reduzir as emissões poluentes. Por fim, as turbinas a gás são motores que acionam um eixo de saída por meio de um fluxo de gases quentes e têm sido usadas em veículos experimentais por mais de 50 anos. Embora vários fabricantes tenham produzido protótipos de veículos pesados de mercadorias, atualmente não há nenhum em produção. As turbinas são mais suaves do que os motores a pistão, consomem menos combustível e emitem menos óxido de nitrogênio e partículas.

5.2 Combustíveis para Veículos Rodoviários

A escolha padrão para veículos comerciais e de carga é um motor de ignição por compressão utilizando o diesel como combustível. Já para os automóveis de passeio e utilitários, a escolha é dos motores com ignição por faísca. Embora os combustíveis predominantes sejam o diesel para motores de ignição por compressão e a gasolina para os de ignição comandada, ambos os tipos de motores podem ser fornecidos ou convertidos para funcionar com gás natural (GNC/GNV) ou gás de petróleo liquefeito (GPL). Estes

combustíveis têm claras vantagens de custo ao abrigo do atual sistema de tributação e resultam também em motores de funcionamento mais silenciosos e limpos (DE ARAÚJO; DE OLIVEIRA, 2020; PEREIRA, 2020).

As empresas de combustíveis no Brasil, assim como diversos países, são legalmente obrigadas a incluir uma adição de biocombustível gasolina e diesel. Previstos em lei, no Brasil, a gasolina deve ter um percentual de etanol de 25% a 27%. Para o diesel, a legislação vigente de 2020, obrigou um percentual de adição de biodiesel de 12% aumentando 1% a cada ano, ou seja, 15% no corrente ano (2023) (CBIE, 2020). Alega-se que essas misturas não apresentam problemas em motores não projetados especificamente para elas, embora os operadores tenham notado alguns (PEREIRA, 2020). O biodiesel está disponível em concentrações maiores, além da mistura 30% (B30 – 30% biodiesel e 70% diesel) uma composição 100% (B100 – 100% biodiesel) já está em uso na União Europeia, mas não deve ser usado a menos que o motor tenha sido certificado pelo fabricante como seguro para eles (BORGES, 2021).

Os biocombustíveis são aqueles que misturam com a gasolina ou o diesel uma proporção de material de origem biológica. No Brasil, para a produção de biodiesel, adicionado ao diesel, é possível a utilização como matéria prima a soja, milho, girassol, amendoim, algodão, canola, mamona, babaçu, palma (dendê) e macaúba, entre outras oleaginosas existentes no país. Já para o etanol, adicionado à gasolina, a principal matéria-prima brasileira utilizada para sua produção é a cana-de-açúcar. Contudo, também pode ser produzido partir do milho, da aveia, do arroz, da cevada, do trigo e do sorgo (JARDINE, 2021).

Atualmente, a pressão de órgãos ambientais para que misturas de maior proporção de biocombustível se tornem o padrão legal, é grande. Políticas públicas foram criadas incentivando o uso dos biocombustíveis misturado aos combustíveis convencionais e assim como o Brasil, passaram obrigam o uso dos biocombustíveis misturados ao produto final comercializados nos postos de combustíveis. Nas figuras 7 e 8 podemos ver as porcentagens mínimas obrigatórias em alguns países do globo. Vale destacar a relevância do Brasil no contexto sendo o país que mais utiliza biocombustível misturado aos combustíveis convencionais (TORROBA, 2021).

5.3 O CONSUMO DE COMBUSTÍVEL NO BRASIL E NO MUNDO

O Brasil é um país em movimento e em expansão. Um estudo realizado pela StoneX (2022) mostra que entre os fatores que contribuíram para este resultado estão o forte saldo comercial com outros países e a expansão do consumo das famílias, em particular no setor de serviços.

Segundo (JARDIM, 2020), os principais tipos de energia utilizados para o transporte no Brasil são:

- Produtos petrolíferos – produtos feitos de petróleo bruto e de processamento de gás natural, incluindo gasolina, combustíveis destilados (principalmente combustível diesel), combustível de aviação, óleo combustível residual e propano;
- Biocombustíveis — etanol e diesel/destilados à base de biomassa;
- Gás natural;
- Eletricidade (produzida a partir de muitas fontes de energia diferentes).

A gasolina é o combustível de transporte dominante em vários países, inclusive no Brasil. Juntamente com o diesel, a gasolina comanda consumo de combustível no Brasil no setor de transporte, principalmente no setor rodoviário (ARAUJO; DE OLIVEIRA, 2020).

A seguir, na Figura 9, conforme levantamentos do EPE (Empresa de Pesquisas Energéticas) pode-se visualizar a demanda de combustível brasileira anual e as previsões para próximos anos, oferecendo uma noção da demanda de combustíveis anuais.

Figura 9 – Demanda anual de combustíveis no Brasil

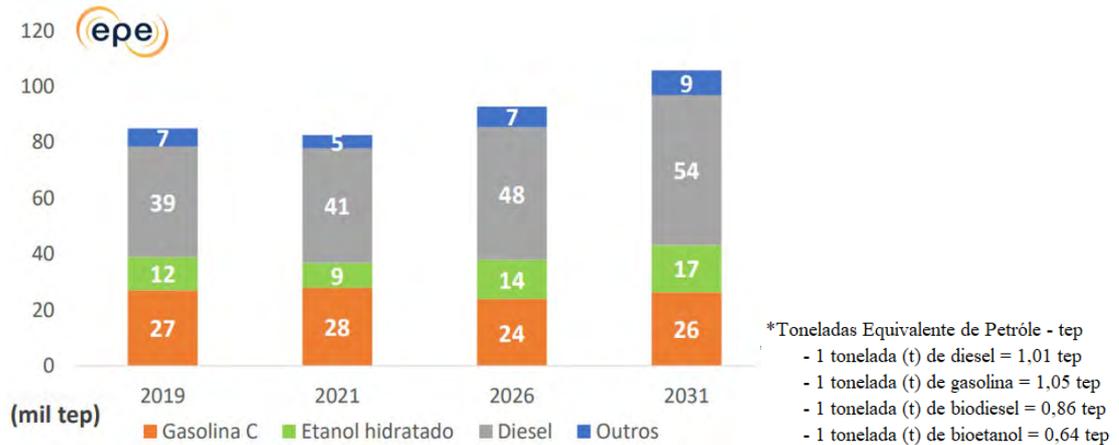


Fonte: EPE (2022) – adaptado pelo autor

Ao notar a demanda brasileira por combustíveis, pode-se analisar o setor de transportes em específico e segundo dados levantados pelo EPE, expressos nas Figuras 10 e 11,

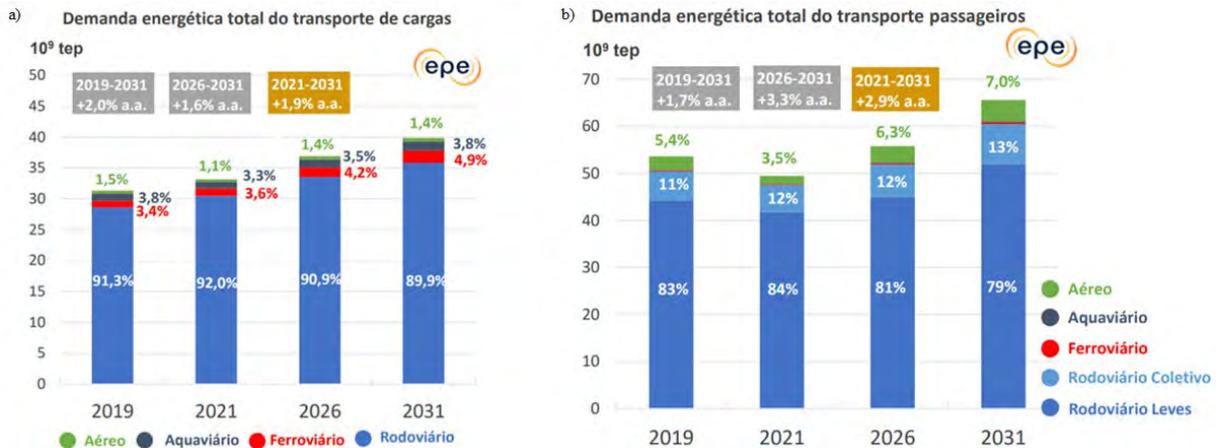
percebe-se a relevância do setor de transporte no consumo de combustíveis do país. Ainda no setor de transportes podemos analisar as demandas energéticas no setor de transporte dos modais.

Figura 10 – Demanda atual e previsão de combustível no setor de transporte



Fonte: EPE (2022) – adaptado pelo autor

Figura 11 – Demanda atual e previsão do consumo de toneladas equivalentes de petróleo (TEP) no transporte de cargas (a) e passageiros (b)

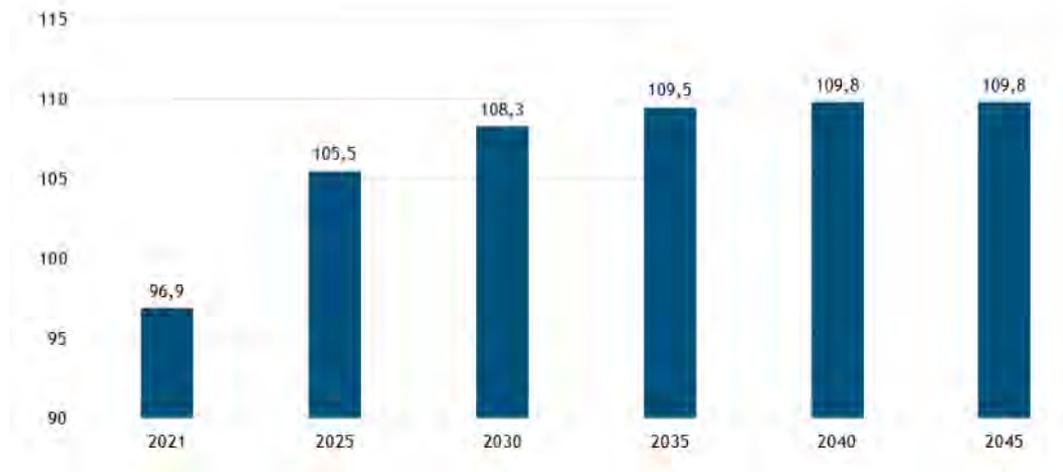


Fonte: EPE (2022) – adaptado pelo autor

O consumo mundial de petróleo atingiu aproximadamente 96,9 milhões de barris por dia em 2021. Este foi um aumento de mais de seis por cento em comparação com o ano anterior, quando o consumo global de petróleo experimentou uma queda como resultado das restrições de mobilidade impostas pela pandemia que, por sua vez, levaram a um declínio na demanda de combustível de transporte. Além dos anos da crise financeira e da pandemia de coronavírus de 2020, o consumo de petróleo aumentou consecutivamente em todos os anos desde 1998 (ESTATISTICA, 2022). Na Figura 12, podemos ver um gráfico elaborado pelo IBP (Instituto brasileiro de Petróleo e Gás) seguindo dados da OPEP/OPEC (Organização dos Países Exportadores de Petróleo - Organization of the Petroleum

Exporting Countries), onde estima um consumo de combustível para médio e longo prazo em milhões de barris de petróleo por dia.

Figura 12 – Demanda energética total do transporte de cargas e passageiros



Fonte: IBP, OPEC (2022) – adaptado pelo autor

6 FATORES CONDICIONANTES PARA O CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

A utilização cada vez mais generalizada de veículos intensificou o consumo de combustível e, conseqüentemente, a emissão de poluentes atmosféricos, causando um impacto ambiental negativo tanto na saúde humana como nas alterações climáticas. É bem sabido que o consumo de combustível do veículo depende de vários fatores, como a tecnologia do motor e do veículo, as características da estrada, as condições de tráfego e a capacidade do motorista, condições essas que, na maioria dos casos, podem ser controladas para obter a melhor taxa de eficiência do veículo. Esses e outros fatores serão abordados nos itens 6.1 a 6.3 a seguir.

6.1 Condição da Pista de Rolagem

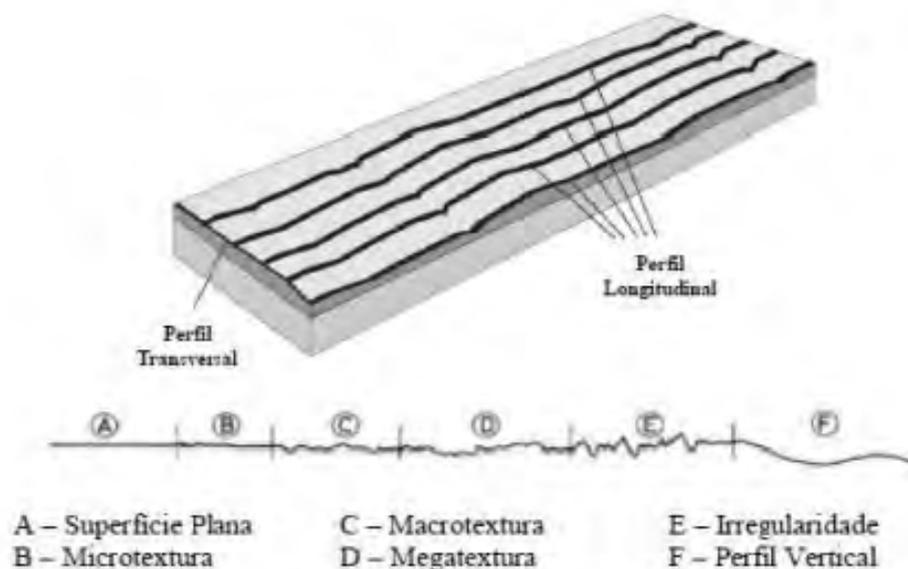
Ao analisar a condição da pista de rolagem, a dinâmica é chamada de Interação do Veículo de Pavimento – PVI (PCI – *Pavement Condition Index*/PSI *Present Serviceability Index*), percebe-se que o consumo de combustível é afetado aumentando as emissões de CO₂ (QUINTANILHA, et al., 2022). Todos os veículos, seja gasolina, diesel ou elétrico, usam energia para se mover, mas parte dessa energia está sendo desperdiçada. Em estradas com más condições de superfície ou propriedades estruturais abaixo da média, os veículos consomem mais combustível do que o necessário para se mover (BARBOSA, 2021).

O PVI se resume a três principais fatores: Irregularidade Longitudinal do Pavimento (IRI - *International Roughness Index*), Textura e Deflexão (MACK, 2017).

O primeiro componente, Irregularidade Longitudinal do Pavimento, refere-se ao conjunto dos desvios da superfície do pavimento em relação a um ponto de referência, desvios estes que podem afetar a qualidade do rolamento e a ação dinâmica das cargas sobre a rodovia, bem como a drenagem superficial da via (DNIT, 2006). Podemos considerar sendo o resultado das diferenças do pavimento existente com o concebido em projeto sendo uma superfície plana e lisa. Esses desvios atrapalham o rolamento rápido e suave dos veículos, geram insegurança aos usuários, além de acelerar a degradação do pavimento (BARELA, 2008).

O IRI é o índice de irregularidades mais conhecido e mais utilizado em todo o planeta. Ele é um indicador estatístico mensurado em metros por quilômetros (m/km) e quantifica as diferenças do pavimento existente em relação ao pavimento projetado (BARELA, 2008). A Figura 13 mostra como as irregularidades longitudinais que podem ser mensurados e posteriormente no Quadro 3 encontramos valores referente á avaliação do pavimento conforme o IRI comparado ao Índice da Condição da Superfície (ICS) que reflete a situação funcional dos pavimentos.

Figura 13 – Irregularidades longitudinais consideradas no IRI



Fonte: (SAYERS & KARAMIHAS, 1998) – adaptado pelo autor

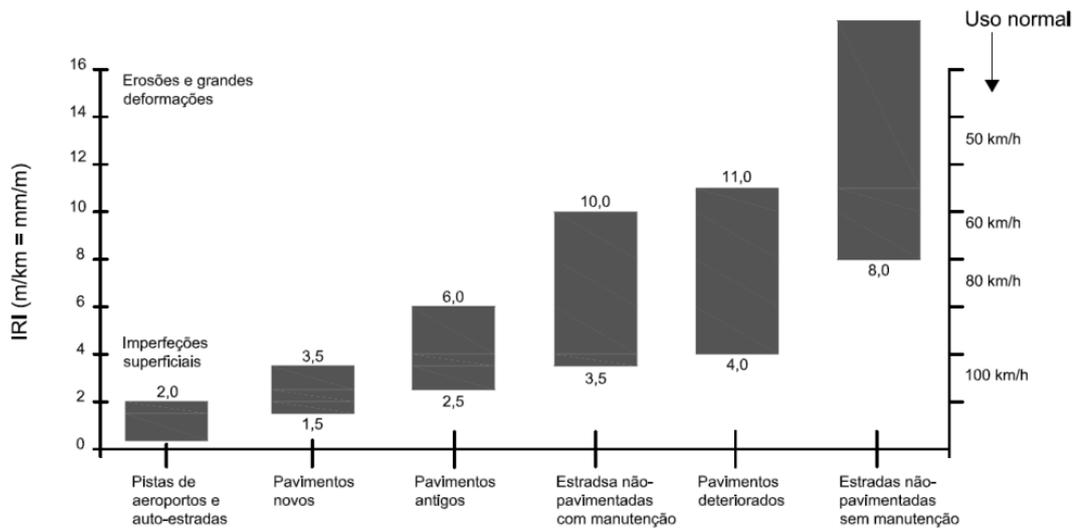
Quadro 3 – Classificações de condição dos pavimentos

IRI International Roughness Index	ICS Índice da Condição da Superfície	Conceito
$0 \leq \text{IRI} \leq 2,5$	5	Ótimo
$2,5 < \text{IRI} \leq 3,5$	4	Bom
$3,5 < \text{IRI} \leq 4,5$	3	Regular
$4,5 < \text{IRI} \leq 6,0$	2	Ruim
$\text{IRI} > 6,0$	1	Péssimo

Fonte: (DNIT, 2017) – adaptado pelo autor

Uma superfície pavimentada com baixo valor de IRI apresenta menor resistência ao rolamento, reduzindo o consumo de combustível dos veículos que trafegam sobre ela. Além disso, um pavimento com IRI elevado pode provocar fadiga e desconforto aos ocupantes dos veículos, além de aumentar o desgaste dos pneus e dos demais componentes do veículo. Portanto, é importante realizar a medição do IRI periodicamente e planejar a manutenção do pavimento de forma a mantê-lo em condições adequadas de uso. Na Figura 14 podemos analisar as faixas de variação do Índice de Irregularidade Internacional avaliando ainda a velocidade normal para cada situação.

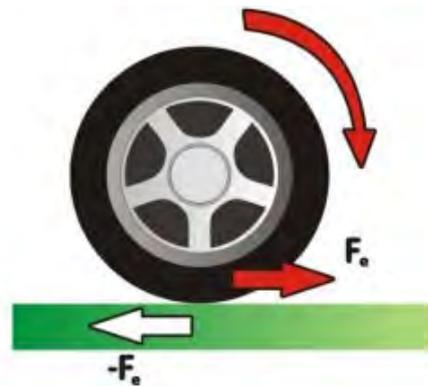
Figura 14 – Faixas de variação do IRI em diversas situações



Fonte: (DNIT, 2011) – adaptado pelo autor

O próximo fator é a textura, a abrasividade da superfície da estrada, que se relaciona com a tração do veículo. Lembrando das Leis de Newton, para que um veículo possa se mover, é necessário o atrito dos pneus com a superfície da pista de rolamento exercendo forças de ação e reação com a superfície. A Figura 14 expressa a interação do pneu com o pavimento gerando o movimento. Além influenciar no consumo de combustível, a textura é considerada um fator de segurança para os veículos pois é diretamente ligada à aderência do veículo com a pista.

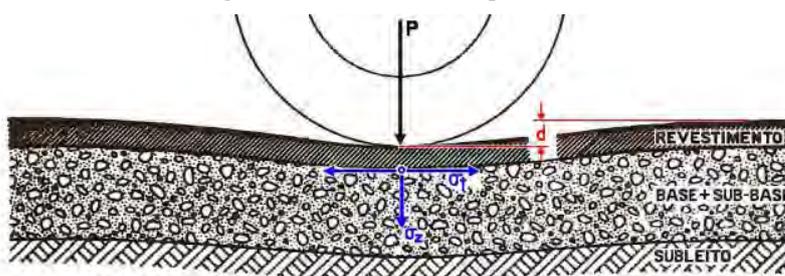
Figura 15 – Força de atrito no movimento dos pneus



Fonte: WERLANG (2013) – adaptado pelo autor

O componente final é a deflexão. A deflexão consiste nos deslocamentos ou deformações verticais sofridos pelo pavimento sob atuações de cargas. Este é um grande fator para caminhões e outros veículos pesados. A deflexão é uma condição determinada pela construção inicial de uma estrada e, em última análise, depende do projeto do pavimento (QUINTANILHA, et al., 2022). Na ilustração (Figura 15), pode-se ver como através da aplicação de uma carga (P) o pavimento pode sofrer um deslocamento (d) elástico.

Figura 16 – Deflexões nos pavimentos.



Fonte: FERREIRA (2007) – adaptado pelo autor

As deflexões podem ser elásticas (recuperáveis) ou plásticas (permanentes). Conforme as solicitações de carga são aplicadas ao pavimento pelos pneus dos veículos, o pavimento sofre uma deformação elástica e uma mínima deformação plástica residual. Com o passar do tempo e após inúmeras solicitações essas deformações plásticas residuais ficam perceptíveis formando diversos defeitos no pavimento. Afundamento de trilho de roda é o mais conhecido deles (FERREIRA, 2007).

Segundo um estudo realizado por Xiaoxia et al. (2015), constatou que a deflexão do pavimento pode afetar o consumo de combustível em até 10%. O estudo concluiu que pavimentos com deflexões menores, ou seja, mais rígidos, apresentam menor consumo de combustível em comparação com pavimentos com deflexões maiores, ou seja, mais flexíveis. Além disso, outros estudos indicaram que um aumento de 0,25 na deflexão pode resultar em um aumento de até 1% no consumo de combustível (BUTT et al., 2022).

O excesso de consumo de combustível e as emissões atmosféricas podem ser significativamente reduzidos através da construção de estradas mais rígidas e da manutenção de pavimentos mais lineares e lisos contudo aderentes. Além disso, juntamente com o consumo de combustível, esses fatores podem levar a uma redução nas emissões de dióxido de carbono (CO_2) (ALMEIDA, 2022; BARBOSA, 2021).

Estudos realizados por Butt, Harvey et al. (2022) no Departamento de Transportes da Califórnia nos Estados Unidos, revelaram em 2022, ao analisar todo o sistema rodoviário do estado, que o PVI representava valores próximos de 1% do consumo total de combustível nas rodovias californianas. Em uma escala do quão vasto é a malha rodoviária do estado, 1% representa cerca de 1 bilhão de galões de combustível que convertendo para litros, representa aproximadamente 3,78 bilhões de litros. Não tão distante, estudos no estado da Virgínia também nos Estados Unidos, Louhghalam, Akbarian, & Ulm (2016), identificaram que o PVI em suas estradas impactou na liberação de 1 milhão de toneladas de CO_2 . Além disso, constatou que cerca de 1,3% de toda a malha rodoviária do estado é responsável por um total de 10% das emissões de CO_2 do setor.

À medida que continua-se a fazer progressos com a eficiência de combustível do veículo, o PVI é um fator que merece grande atenção. Ações que melhorem o projeto e as condições dos pavimentos da podem reduzir o consumo de combustível e as emissões de dióxido de carbono (CO₂) dos veículos. Além disso, torna-se um fator importante para as autoridades estaduais que devem querer melhorar a manutenção, o planejamento e o orçamento do transporte para que os contribuintes possam obter o retorno mais eficaz para o seu dinheiro de transporte.

6.2 Tipos de Pavimento

O tipo de pavimento utilizado de uma rodovia pode ter um impacto considerável no consumo de combustível dos veículos que trafegam sobre ela. De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), a escolha do tipo de pavimento pode afetar o consumo de combustível em até 20% dependendo da distância em que se percorre nesse pavimento. Sendo assim, é crucial selecionar o tipo de pavimento adequado para cada situação, levando em consideração diversos fatores, como o tráfego esperado, as condições climáticas, a durabilidade e os custos de construção e manutenção. Atualmente, considerando as rodovias, existem basicamente 2 tipos de pavimentos: pavimentos rígidos e pavimentos flexíveis.

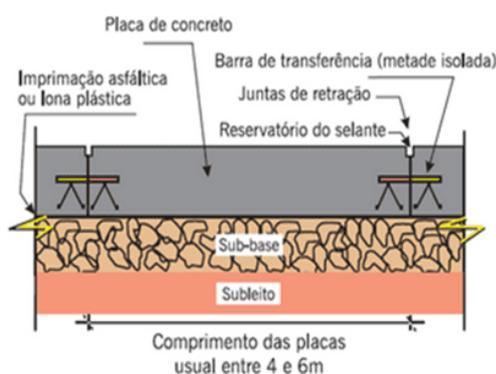
O pavimento rígido é caracterizado distribuição das cargas aplicadas sobre a camada de rolamento de forma mais uniforme aliviando os esforços aplicados na base. Comumente, são os pavimentos produzidos com concreto simples ou armados em formas de placas. Essas placas são assentadas na sub-base, que se trata de uma estrutura da fundação, podendo ser formada por armaduras de aço desempenhando o papel de revestir a base (BALBO, 2009). As placas compreendem um revestimento que apresenta uma espessura fixa com grande rigidez quando comparada com as demais camadas do pavimento, garantindo que quase todas as cargas e tensões provocadas pelos usuários da rodovia seja absorvida por ela (BERNUCCI, 2010).

De acordo com o DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006), pavimentos rígidos são aqueles construídos com concreto de cimento Portland, concreto asfáltico, lajotas de concreto ou outros materiais rígidos. Eles são utilizados em rodovias com tráfego intenso de cargas e veículos pesados, bem como em áreas urbanas e industriais com tráfego intenso. Os pavimentos rígidos apresentam alta resistência à deformação e desgaste, são duráveis e requerem pouca manutenção.

Em sua estrutura (Figura 16), a camada de rolamento nada mais é do que uma placa de concreto simples ou armado (dependendo do tráfego dimensionado) unida a outras placas

por meio de barras de transferência e ligação. Além disso, na camada de rolamento são feitos cortes transversais funcionando como juntas de dilatação evitando trincas e rachaduras pela dilatação e retração do material e aplicação de selantes para prolongar sua vida útil e manter as características de aderência e segurança. A subestrutura dos pavimentos rígidos é formada pela base e sub-base, que são camadas de material granular compactado. A base tem como função suportar e distribuir as cargas do tráfego para a sub-base, que é uma camada mais espessa e resistente, responsável por melhorar a capacidade de suporte do subleito. A escolha do material e espessura das camadas depende das condições locais e do tipo de tráfego. É fundamental que as camadas sejam compactadas adequadamente para garantir a estabilidade e durabilidade do pavimento.

Figura 17 – Estrutura de um pavimento rígido



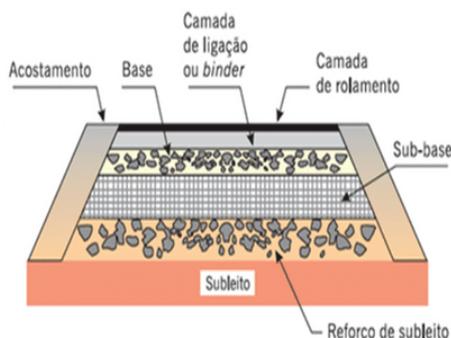
Fonte: BERNUCCI (2010) – adaptado pelo autor

Já os pavimentos flexíveis, o DNIT (2006) define como aqueles que têm uma camada superficial de asfalto (capa de rolamento) sobre uma camada de base granular e/ou sub-base. Eles são projetados para distribuir as cargas do tráfego de maneira uniforme, absorver deformações do solo e dissipar a energia das cargas dinâmicas. Os pavimentos flexíveis também oferecem uma superfície de rolamento suave e uniforme, reduzem o ruído do tráfego e requerem menos tempo e custo para a construção e manutenção em comparação com os pavimentos rígidos.

Analisando a estrutura dos pavimentos flexíveis (Figura 17), a camada de rolamento, camada superior do pavimento, é composta por um revestimento asfáltico ou por uma mistura asfáltica, que proporciona a aderência entre os pneus dos veículos e o pavimento, além de garantir conforto e segurança para os usuários da via. Abaixo da camada de rolamento, encontra-se a camada de base, que distribui as cargas do tráfego para a camada de sub-base. A sub-base melhora a capacidade de suporte do subleito e distribui as cargas para o solo de fundação. Pode haver uma camada de reforço do subleito abaixo da sub-base. O subleito é a camada mais profunda e deve apresentar características adequadas de suporte

para garantir a estabilidade e a durabilidade do pavimento. Cada camada é dimensionada de acordo com as características do tráfego e das condições climáticas da região.

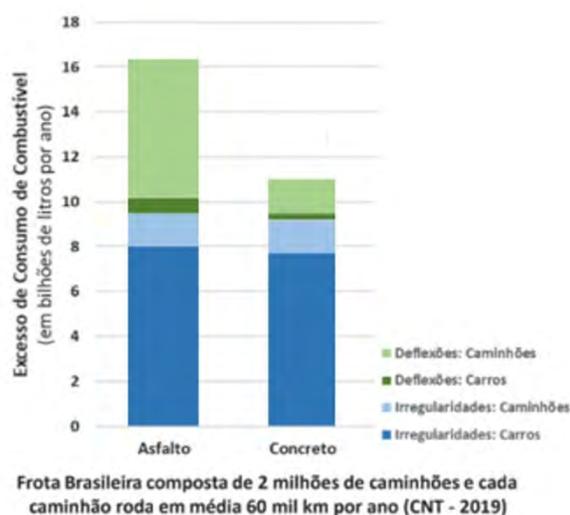
Figura 18 – Estrutura de um pavimento flexível



Fonte: BERNUCCI (2010) – adaptado pelo autor

Estudos realizados na Instituto de Tecnologia de Massachusets (MIT - Massachusetts Institute of Technology) e apresentados por Leme (2021), comprovaram que o tipo de pavimento possui grande influencia no consumo de combustível. As pesquisas de campo buscaram comparar os impactos nos veículos que trafegam em pavimentos flexíveis e rígidos. A partir dos dados obtidos no estudo do MIT, Leme (2021) verificou que, apenas com a frota de veículos de cargas (caminhões e afins), 5,3 bilhões de litros de combustíveis seriam economizados anualmente se os pavimentos flexíveis fossem substituídos pelos pavimentos rígidos nas estradas brasileiras. A seguir, na Figura 18, é possível relacionar a eficiência energética quanto a economia no consumo de combustível frente aos pavimentos flexíveis e rígidos.

Figura 19 – Comparação da economia de combustível entre pavimento rígidos e flexíveis

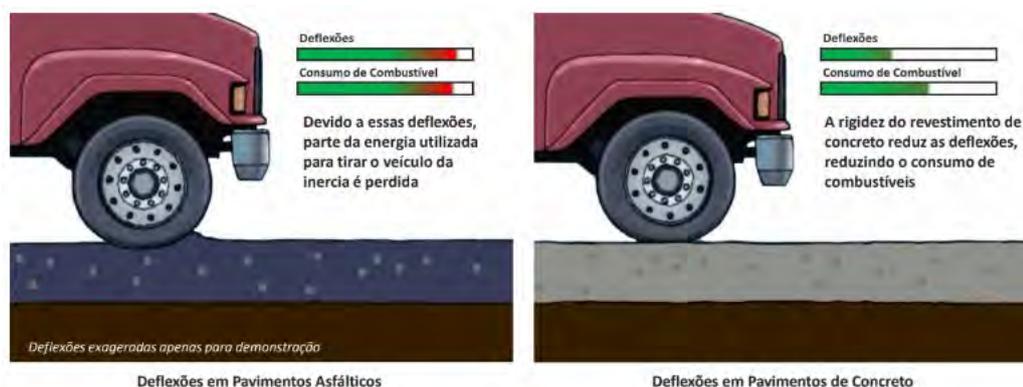


Fonte: LEME (2021) – adaptado pelo autor

Essa economia deve-se pelo fato de que pavimento rígido sofrer deflexões mais baixas comparado ao pavimento flexível. Com isso, como exposto em itens anteriores sobre a

deflexão dos pavimentos, os veículos tem que fazer um esforço menor para o movimento, o que leva a um gasto menor de combustível. A Figura 19 mostra como a deflexão age nos pneus dos carros gerando maior consumo de combustível.

Figura 20 – Comparação da economia de no consumo de combustível entre pavimentos rígidos e flexíveis



Fonte: LEME (2021) – adaptado pelo autor

6.3 Outros fatores

Além dos fatores mencionados, relacionados ao pavimento e foco do presente estudo, há outros fatores que também influencia o consumo de combustível, como a geometria da rodovia, má condição da embreagem, condução em marcha errada, combustível de baixa qualidade, má manutenção, mau estado dos pneus, peso do veículo, uso do ar condicionado, que serão brevemente abordados nesse item, entre outro.

- a) Geometria da rodovia: Curvas acentuadas ou inclinações íngremes podem exigir mais potência do motor para manter a velocidade desejada. Além disso, obstáculos como quebra-molas ou lombadas podem exigir que o motorista reduza a velocidade e, em seguida, acelere novamente, o que pode aumentar o consumo de combustível. Por outro lado, estradas com geometria mais suave e com menos obstáculos podem permitir que o veículo mantenha uma velocidade mais constante, o que pode resultar em um consumo de combustível mais eficiente.
- b) Má condição da embreagem: Quando a embreagem do carro está em más condições, ocorre deslizamento, que é o contato reduzido entre a placa de pressão e a embreagem. Isso faz com que uma parte da energia gerada pelo motor seja desperdiçada e não entregue às rodas. O resultado disso é uma maior quantidade de combustível sendo usada desnecessariamente.
- c) Condução em marcha errada: Cada marcha tem um limite de velocidade, e isso deve ser observado com cautela. Dirigir um veículo em velocidades mais altas

usando marchas mais baixas, o RPM (rotações por minuto) será maior e o motor consumirá mais combustível.

- d) Combustível de baixa qualidade: Combustíveis de má qualidade exigirá quantidades maiores para alimentar o motor. Isso também aumentará o acúmulo de resíduos após a queima do combustível nas válvulas de admissão e nos bicos injetores trazendo condições inadequadas com funcionamento prejudicado ao veículo.
- e) Má Manutenção: Uma má manutenção do veículo pode acarretar defeitos nos motores levando a um consumo excessivo de combustível. A substituição de peças defeituosas, como velas de ignição, filtros de combustível e sensores de oxigênio, é essencial para manter o motor em boas condições.
- f) Mau estado dos pneus: Pneus velhos perdem a tração na estrada e precisam girar mais para manter uma certa velocidade. A baixa pressão dos pneus também pode levar a um maior consumo de combustível. A excelente condição dos pneus é essencial para o consumo regular de combustíveis mantendo a aderência do veículo com a faixa de rolamento além de aumentar a segurança para os condutores.
- g) Peso do veículo: O peso de um veículo é um fator importante na quantidade de combustível que ele consumirá. Quanto mais pesado o veículo, mais energia ele precisa para se mover. O peso extra também aumenta a resistência ao rolamento de um veículo, que é uma força que resiste ao movimento para a frente produzido à medida que as rodas rodam sobre a estrada. Isso significa que a redução de peso é uma maneira muito eficaz de reduzir o consumo de combustível de um veículo.
- h) Uso do ar condicionado: O uso do sistema de ar-condicionado de um veículo aumenta seu consumo de combustível mais do que qualquer outro recurso auxiliar. Um sistema de ar condicionado pode aumentar o consumo de combustível em até 20% devido à carga extra no motor. A carga real depende do tamanho interior do veículo, da temperatura exterior e de outras condições.

7 MODELOS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Muitas vezes a avaliação do consumo de combustível é realizada dentro de ferramentas que avaliam o VOC (*Vehicle Operating Cost* – Custos Operacionais Veiculares) onde são analisados os custos gerais para a operação veicular nas rodovias. Dentro dos custos operacionais, podemos estimar diversos custos separadamente, como por exemplo os custos relacionados ao consumo de combustível. A seguir (Quadro 4) podemos parâmetros para os diferentes modelos na literatura de Custos Operacionais Veiculares (CHATTI E ZAABAR, 2012).

Quadro 4 – Características de estudadas nos diferentes modelos VOC

Característica	Modelos VOC						
	HDM 3	COBA9	VETO	NIMPAC	ARFCOM	TRDF	HDM 4
Empírico	X	X	-	X	-	X	-
Mecânico	X	-	X	-	X	-	X
<i>Nível de Agregação</i>							
Simulação	-	-	X	-	X	-	X
Nível de Projeto	X	X	X	X	X	X	X
Nível de Rede	X	X	-	X	X	-	X
<i>Operação do Veículo</i>							
Velocidade Uniforme	X	X	X	X	X	X	X
Curvas	X	-	X	X	X	X	X
Mudança de Velocidade	-	-	X	X	X	X	X
Mudança de Marchas	-	-	X	X	X	X	X
<i>Veículos Típicos</i>							
Padrão	X	X	X	X	X	X	X
Especificação de Usuário	X	-	X	-	X	-	X
Caminhão Moderno	X	-	X	X	X	-	X
<i>Variáveis Relativas à Rodovia</i>							
Gradiente	X	X	X	X	X	X	X
Curvatura	X	X	X	X	X	X	X
Superelevação	X	-	X	-	X	-	X
Rugosidade	X	-	X	X	X	X	X
Tipo de Pavimento	X	-	X	X	X	-	X
Textura	-	-	X	-	X	-	X
Neve e Água	-	-	X	-	X	-	X
Vento. Temperatura	-	-	X	-	X	-	X
Elevação Absoluta	X	-	X	-	X	-	X
<i>Componentes VOC</i>							
Combustível. Óleo. Pneus. Reparo / Manutenção. Depreciação.	X	X	X	X	X	X	X
Juros	X	-	X	X	-	-	X
Avarias na Carga	-	-	X	-	-	-	-
Despesas Gerais.	X	X	X	-	-	-	-
Estoque da Frota.	-	X	X	-	-	-	-
Emissões.	-	-	X	-	-	-	X

Fonte: CHATTI E ZAABAR (2012) – adaptado pelo autor

Analisando o Quadro 4, pode-se observar os vários fatores que decorrem dos custos de operação de veículos. Pelo uso inevitável de combustível ao realizar transporte de veículos,

uma das principais características que dever ser analisada ao abordar o VOC, é o seu consumo. Os modelos estatísticos para o quantificar o consumo de combustível dos veículos que trafegam na rodovia podem englobar diversas características. Parâmetros como velocidade, aceleração, torque do motor, tipo de pavimento, condições do pavimento, condições climáticas, estilo de condução, tipo de veículo, geometria da rodovia, entre outros, podem ser utilizados para quantificar isso e verificar a oscilação no consumo de combustível dos veículos. Esses modelos são úteis para estudos de eficiência veicular e podem ser usados por fabricantes de automóveis, operadoras de frota, concessionárias de rodovias e governos interessados em avaliar o desempenho de veículos, políticas de eficiência energética e os custos operacionais veiculares frente as rodovias. Nos próximos itens será abordado as formas de avaliar a quantificação de combustível frente a condições do pavimento.

Nos itens 7.1 e 7.2 a seguir, serão apresentados dois modelos gerais mais conhecidos no âmbito da gerencia de rodovias com suas propostas de avaliação do consumo de combustível. Nos itens subsequentes, serão apresentados autores que avaliaram o consumo de combustível frente as condições do pavimento.

Como dito anteriormente, existem diversos outros fatores condicionantes ao consumo de combustível como veículo, trânsito, clima, e outros, que foram base de estudos de diversos autores, porém os selecionados para apresentação foram os que avaliaram o consumo de combustível frente as condições do pavimento. Esses modelos foram desenvolvidos por diferentes autores, épocas e locais, possuindo, cada um suas particularidades. Ao final no item 7.6 será apresentado um quadro entre as variáveis e as especificidades dos diferentes modelos abordados pelos autores expostos no trabalho.

7.1 NIMPAC

O modelo NIMPAC (*NAASRA Improved Model for Project Assessment and Costing - NAASRA Modelo aprimorado para avaliação de projetos e cálculo de custos*) foi desenvolvido entre 1968 e 1973 pelo Departamento de Estradas principais, a Austrália Ocidental e pelo antigo *Bureau of Roads da Commonwealth* (Comunidade Britânica de Nações) a partir de uma mescla de estudos domésticos e estrangeiros. Suas estimativas são consideradas bastante realistas para as condições rurais da Austrália e consistente com outros estudos internacionais provavelmente em função de sua constante atualização dos tipos de veículos e custos unitários (AMBOS, 1982; BEIN, 1993).

A resultado do programa NIMPAC é um conjunto de custos dos usuários de uma rodovia para cada seção da estrada. As despesas com rodoviária são divididas em despesas de

manutenção de rotina e os vários componentes dos custos associados a projetos de melhoria por exemplo, recuperação superfície, aquisição de terras, duplicações entre outros (AMBOS, 1983). Os principais custos ao usuário da estrada, tempo de viagem e custos operacionais do veículo são derivados por tipo de veículo e outros fatores. Os custos associados a acidentes também são estimas.

Sua aplicação muitas vezes é criticada devido a dificuldades em medir alguns custos e benefícios em termos monetários. Benefícios intangíveis, como o conforto físico dos usuários da estrada, não têm valor de mercado. Custos e benefícios impostos a usuários não rodoviários geralmente são difíceis de incorporar na análise. Maior turismo, segurança, aumento do potencial de produção e efeitos de poluição por ar e ruído são fatores relevantes que são praticamente impossíveis de quantificar em valores monetários (THORESEN, 1988).

Para estimar o consumo de combustível o modelo faz uso de uma abordagem empírica. Ele consiste em um conjunto de equações que relacionam o consumo de combustível à velocidade do veículo, aceleração e outros parâmetros, como inclinação da estrada e peso do veículo. O modelo foi desenvolvido com base em dados experimentais coletados de uma variedade de veículos sob diferentes condições de direção, e as equações foram ajustadas a esses dados usando métodos estatísticos, como análise de regressão múltipla. (TAN, THORESEN, EVANS, 2012)

A seguir apresenta-se a equação generalista (1) para o consumo de combustível prevista pelo modelo.

$$\text{Consumo de Combustível} = \frac{\text{Relação Básica Combustível / Velocidade}}{\text{Velocidade}} * \left[1 + \frac{\text{Eficiência do Motor}}{\text{do Motor}} + \frac{\text{Curvatura de Pista}}{\text{de Pista}} + \text{IRI} + \frac{\text{Congestionamentos e Tráfego}}{\text{e Tráfego}} \right] \quad (1)$$

O modelo NIMPAC é considerado um modelo empírico, pois se baseia em dados experimentais para estimar o consumo de combustível de um veículo. As variáveis do modelo são determinadas a partir de testes em laboratório ou em condições de condução real e ajustadas para fornecer a melhor correlação possível entre os dados de entrada e saída. Embora o modelo leve em consideração várias variáveis, como velocidade, aceleração e carga, ele não se baseia diretamente em princípios físicos do motor ou do veículo, como seria o caso de um modelo mecanicista.

7.2 HDM-4

Desenvolvido pelo Banco Mundial, O HDM-4 (*Highway Design and Maintenance Standard Model 4*) é um sistema computacional utilizado para avaliar os aspectos técnicos

e econômicos de investimentos em rodovias. O modelo armazena dados sobre a características de redes viárias, tipos de veículos, obras rodoviárias, programas de investimentos e estratégias de gestão. É uma importante ferramenta de apoio à tomada de decisões relacionadas à conservação e à reabilitação de pavimentos permitindo uma ampla personalização com definição de custos unitários, composição de tráfego, características da via, coeficientes de modelos e outros adequados às condicionantes locais (STANNARD, 2006; ARANGO ALVAREZ, 2020).

O HDM-4 é utilizado para fazer estimativas comparativas de custos e avaliações econômicas de diferentes opções de investimento, tanto para uma rodovia específica como para uma malha rodoviária. Ele pode estimar os custos totais para um grande número de projetos alternativos e estratégias, possibilitando análises na forma de menores custos, maiores benefícios. O desenvolvimento do modelo HDM iniciou-se no final dos anos 1960 e prosseguiu com a realização de estudos para ampliação da base de dados e desenvolvimento e aprimoramento de modelos. A última versão, o HDM-4, foi lançada em 2000. No entanto, vinte e três anos depois, novos avanços significativos na tecnologia dos veículos podem indicar a necessidade de atualização do HDM-4 (WATANATANA, 1987; ARANGO ALVAREZ, 2020).

Anteriormente ao modelo HDM-4, as estimativas para o consumo de combustível no modelo HDM-III compreendiam de equações pouco padronizadas em termos estruturais e, assim como o modelo NIMPAC, podemos considera-lo um modelo empírico (TAN, THORESEN, EVANS, 2012) A seguir, na Equação (2), podemos analisar a sua estrutura geral.

$$\text{Consumo de Combustível} \left(\frac{\text{L}}{1000\text{km}} \right) = \frac{\text{Eficiência do Motor}}{a} * \left\{ \frac{\text{Combustível em Usado}}{\text{Marcha Lenta}} + \left[\left(\text{Greide} + \text{IRI} \right) * \frac{\text{Massa do Veículo}}{\text{do}} * \frac{\text{Velocidade do Ar}}{\text{do}} + \left(\text{Resistência} * \text{Velocidade}^2 \right) \right] \right\} \quad (2)$$

No modelo HDM-4, o Banco Mundial alterou o algoritmo de consumo de combustível do modelo antigo para os algoritmos do ARFCOM (*Australian Road Fuel Consumption Model* - Modelo Australiano De Consumo De Combustível Rodoviário). Com a manipulação apropriada do modelo, considerado mecanicista, é possível gerar relações estáveis com de consumo de combustível com uma gama de condições de estradas, tráfegos e IRI que não seriam possíveis considerando um modelo empírico. (TAN, THORESEN, EVANS, 2012). Ainda assim, considerando que as tecnologias veiculares evoluem rapidamente, os modelos mecanicistas possuem melhores aplicações. Com esses modelos os ajustes às novas tecnologias podem ser facilmente adequados as equações sem grandes realizações de ensaios e experiências (McLEAN & FOLET, 1998).

Para calcular os custos operacionais, o HDM-4 utiliza diversas variáveis, como a condição da faixa de rolamento. A partir disso, podemos calcular o VOC (Custos Operacionais Veiculares) que são calculados baseados em fatores como consumo de combustível, desgaste de pneus, desgaste mecânico, manutenções dos veículos, entre outros. A seguir, na Tabela 1, podemos ver as equações do modelo.

Tabela 1 - Modelo de consumo de combustível no HDM-4

Nome	Descrição	Unidade
IRI_m	$IRI_m = 0,5 \cdot (IRI_a + IRI_b)$	m/km
IRI_a	Irregularidade no início do ano em análise	m/km
IRI_b	$IRI_b = \min[(IRI_a + \Delta RI), a_0]$	m/km
a_0	Irregularidade máxima fornecida pelo usuário	m/km
ΔRI	Incremento total na irregularidade no ano em análise $\Delta RI = K_{gp}(\Delta RI_s + \Delta RI_{TR} + \Delta RI_{ATR} + \Delta RI_p) + \Delta RI_E$	m/km
K_{gp}	Fator de calibração	-
ΔRI_s	Incremento na irregularidade devido ao componente estrutural $\Delta RI_s = K_{gs} \cdot 134 \cdot \exp(K_{gm} \cdot m \cdot AGE) \cdot (1 + SNCK_b)^{-5} \cdot N$	m/km
K_{gs}	Fator de calibração para o componente estrutural da irregularidade	-
K_{gm}	Fator de calibração para o coeficiente ambiental	-
M	Coefficiente ambiental	-
AGE	Idade do pavimento em anos	-
N	Número anual de repetições do eixo padrão – Método da AASHTO	-
$SNCK_b$	Número estrutural corrigido devido ao trincamento ao final do ano em análise $SNCK_b = \max[(SNCK_a - dSNCK); 1,5]$	-
$SNCK_a$	Número estrutural corrigido no início do ano em análise	-
$dSNCK$	Redução do número estrutural corrigido devido ao trincamento $dSNCK = K_{snck} \cdot 7,58 \times 10^{-5} \cdot \{\min(63, TR_a) \cdot h + \max[\min[(TR_a - TRX), 40], 0] \cdot h'\}$	-
K_{snck}	Fator de calibração para o SNC	-
TR_a	Percentual de área trincada no início do ano em análise	-
TRX	Percentual de área trincada na superfície do pavimento antigo	-
H	Espessura da mais recente camada de revestimento	mm
h'	Espessura total dos revestimentos antigos	mm
ΔRI_{TR}	Incremento na irregularidade devido ao trincamento $\Delta RI_{TR} = K_{gc} \cdot 0,0066 \cdot \Delta TR$	m/km
K_{gc}	Fator de calibração para o componente de trincamento da irregularidade	-
ΔTR	Aumento percentual na área com presença de trincamento durante o ano em análise	-
ΔRI_{ATR}	Incremento na irregularidade devido ao afundamento em trilha de roda $\Delta RI_{ATR} = K_{gr} \cdot 0,088 \cdot \Delta DP$	m/km
K_{gr}	Fator de calibração para o componente de afundamento em trilha de roda da irregularidade	-

Continua

		Continuação
Nome	Descrição	Unidade
ΔDP	Aumento no desvio padrão do afundamento em trilha de roda durante o ano em análise	mm
ΔRI_p	Incremento na irregularidade devido a presença de panelas $\Delta RI_p = K_{gp} \cdot 0,00019 \cdot (2 - FM) \cdot (NPT_{bu}^{1,5} - NPT_a^{1,5})$	m/km
K_{gp}	Fator de calibração para o componente de panelas da irregularidade	-
FM	Índice de liberdade de manobras (variando de 0 a 1)	-
NPT_a	Unidades de panelas por km no início do ano em análise	un/km
NPT_{bu}	Unidades de panelas por km no final do ano em análise percebidas pelo usuário $NPT_{bu} = NPT_b \cdot \left[1 - \frac{P_{pt}}{100} \cdot \left(1 - \frac{F_{pt}}{365} \right) \right]$	un/km
NPT_b	Unidades de panelas por km no final do ano em análise	un/km
P_{pt}	Percentual de panelas tapadas com remendos	-
F_{pt}	Frequência de execução de remendos em panelas	dias
ΔRI_E	Incremento na irregularidade devido as condições ambientais $\Delta RI_E = K_{gm} \cdot m \cdot RI_a$	m/km
RI_a	Irregularidade no começo do ano em análise	m/km

Fonte: ODOKI E KERALI (2006) – Adaptado pelo autor

Como exposto na Tabela 1, pode-se analisar as equações do modelo utilizado diversas características da relacionadas a rodovia e ao veículo. Além disso, elas são calibradas de acordo com as características de cada região tornando o modelo bastante complexo. Por exemplo, o consumo de combustível (FC) é determinado através da média entre o consumo de subida (u) e descida (d) para cada tipo de veículo (k) e para cada período de fluxo de tráfego (p). Para isso, é considerado o consumo instantâneo na subida e na descida (IFC) que dependem da potência total requerida (PTOT), compreendida pela potência tratora (PTR) que, por sua vez, depende da resistência total ao rolamento (FTR) englobando a resistência aerodinâmica (FA), resistência de rampa (FG), resistência a curvatura (FCV) e resistência ao rolamento (FR) que engloba a variável CR2 dependente da Irregularidade Longitudinal do Pavimento.

7.3 Ko et. al. (2010)

Avaliando que o consumo combustível é um dos maiores componentes dos Custos Operacionais Veiculares (VOC), o estudo produzido por Ko et al. no Departamento de Engenharia Civil e Engenharia Ambiental da Universidade de Saitama na Coreia do Sul buscou avaliar o consumo de combustível para veículos em diferentes rodovias com diferentes Índices de Irregularidade Longitudinal (IRI). Para isso selecionou dois segmentos de rodovias com 3km de distância entre o ponto inicial e final com diferentes IRI analisando seus dois sentidos sendo elas Nampo (IRI=3,56) e Skum (IRI=3,59). Os testes foram

conduzidos utilizando 2 modelos de veículos para os parâmetros estipulados pelo HDM-4 sendo um carro de passageiros médio e um carro de passageiros grande:

- a) NF Sonata (2007) – Carro Médio
- b) Grandure TG (2006) – Carro Grande

Vale ressaltar que ambos os veículos são automáticos e utilizam a gasolina como combustível. Foram analisadas 4 faixas de velocidade reguladas pelo motorista dos veículos utilizando GPS, sendo elas:

- a) 40km/h;
- b) 60km/hr;
- c) 80km/h; e
- d) 100km/h.

Ko et al. (2010) realizou 2 levantamentos de dados para cada veículo percorrendo os trechos dois trechos do estudo uma vez no sentido Norte/Sul, outra vez no sentido Sul/Norte para cada velocidade constante estipulada. Para medir o consumo de combustível, foram utilizados componentes eletrônicos acoplados aos injetores de combustível no motor no carro que são capazes de quantificar o período de injeção de combustível e através da equação a seguir (3), quantificar o volume de combustível liberado.

$$Qtd. de combustível injetada = Fator de correção * Período de injeção \quad (3)$$

O fator de correção foi considerado quantificando o período de injeção a diferença da massa do veículo ao dirigir cerca de 400km em velocidade constante pois a diferença de massa no veículo deu-se pelo consumo de combustível.

A partir de testes realizados por diferentes modelos de veículos quanto a taxa de combustível gasta em diferentes velocidades considerando rodovias com diferentes IRI foram levantados os resultados levantou resultados e considerou um modelo geral para seu estudo. A seguir no Quadro 5 podemos ver os resultados do obtidos com os testes realizados.

Quadro 5 – Resultados dos testes realizados em cada estrada

RODOVIA	VELOCIDADE (km/h)	IRI (m/km)	CONSUMO DE COMBUSTIVEL (km/L)	
			TG(3,300cc)	NF(2,000cc)
Nampo	40	3,56	14,34	15,97
	60		18,92	19,33
	80		16,18	17,59
	100		12,93	13,92
	Média		15,59	16,70
Skmun	40	3,59	13,62	15,62
	60		18,44	18,92
	80		15,87	16,05
	100		12,73	13,78
	Média		15,17	16,09

*TG = TG Sonata (2007)
 *NF = Grandure TG (2006)
 *cc = Cilindradas do Motor

Fonte: (KO. K. H. et al., 2010) – adaptado pelo autor

Avaliando os resultados para diferentes IRI, podemos ver um leve aumento no consumo de combustível conforme o IRI aumenta. Com isso o autor chegou ao modelo de consumo de combustível para seu estudo, representado na Equação de 1ª ordem (4) a seguir:

$$FE = a * IRI + b \quad (4)$$

FE = Consumo de combustível expresso em litros a cada 10 quilômetros(L/100km)

IRI = Índice de Irregularidade Longitudinal expresso em metros por quilômetros (m/km)

a = 7,00

b = -18,73

Ao analisar os resultados obtidos (Quadro 5) pode-se ver um aumento expressivo de até 7% no consumo de combustível. Sendo considerados 0,21% para cada unidade de IRI variada. Contudo, pode-se notar que os valores de IRI para os segmentos de rodovias estudados são muito próximos limitando o estudo. Sendo assim, vale ressaltar que a equação não abrange todos os casos sendo apenas aplicada ao estudo específico do autor.

7.4 Ross (1980)

Em 1980, o Departamento de Transporte de Wisconsin nos Estados Unidos conduziu um estudo de campo local que procurou definir, para aplicação prática, a relação entre o consumo de combustível de automóveis e a rugosidade do pavimento. Para isso, testou três modelos de carros diferentes (Chevrolet Chevette 1980, American Motors Concord 1980 e Chevrolet Impala 1979) sobre cinco seções distintas de diferentes rodovias de concreto asfáltico com 4000ft (1,2892km) de comprimento que, coletivamente, representavam uma ampla variação quanto a condição do pavimento (ROSS, 1980).

A Interação do Veículo de Pavimento – PVI (PCI – *Pavement Condition Index*/PSI *Present Serviceability Index*) sendo uma medida padronizada para avaliar a condição de superfície de uma pavimentação e usado para indicar a qualidade da superfície em termos de conforto do usuário e desempenho do veículo. Quanto menor o valor do PCI, maior é a irregularidade da superfície, ou seja, maior o IRI. É possível ver uma relação anteriormente mostrada no Quadro 3 considerando que o ICS (Índice de Condição da Superfície) representa os mesmos valores de PVI. O PVI é amplamente utilizado para avaliar a condição de estradas e rodovias em todo o mundo. O quadro a seguir (Quadro 6) mostra os índices de serviço quanto aos trechos diferentes sentidos dos trechos onde foram realizados os testes.

Quadro 6 – Interação Veículo Pavimento nos diferentes segmentos avaliados

Segmento do Teste	PVI / PCI / PSI	
	Sentido Norte/Leste	Sentido Sul/Oeste
1	4,4	4,4
2	3,6	3,5
3	2,1	2,2
4	1,9	1,9
5	0,9	0

Fonte: (ROSS, 1980) – adaptado pelo autor

Os parâmetros estipulados para a realização do teste foram:

- Controle do vento no local do teste não sendo possível a realização do teste com velocidade do vento acima de 3mph (4,83km/h) sendo controlado com bandeiras ao longo de todo o trecho estipulado;
- Velocidade nominal do veículo de 55mph (88,51km/h) sendo permitidos o desvio padrão de $\pm 0,5$ mph mantendo uma uniformidade da velocidade durante o teste;
- A pressão dos pneus para todos os carros foi mantida em $32 \pm 0,5$ psi, determinada por leituras antes, durante e após os testes em cada local;
- Combustível mantido acima do nível de meio tanque em todas os testes.
- A temperatura do ar e do combustível foram medidas durante os testes para correções estatísticas desenvolvidas pela *Society of Automotive Engineers* (Sociedade de Engenheiros Automotivos).

Foram realizados um total de 355 testes distribuídos nos trechos para os diferentes veículos. Desses 355, apenas 257 foram validados e os outros descartados por ter sofrido algum tipo de interferência externa ou descumprido os parâmetros inicialmente estipulados. No Quadro 7 a seguir podemos ver os resultados obtidos frente ao consumo de combustível comparado com a melhor condição de pavimento dos locais estudados.

Quadro 7 – Diferença no consumo de combustível nos diferentes segmentos avaliados.

Veículo	[(gal/mile)*10 ⁻³]					(l/km)				
	Segmento					Segmento				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Chevette	-	+ 0,077	- 0,056	+ 0,673	+ 1,899	-	+ 0,000181	- 0,000132	+ 0,001583	+ 0,004467
Concord	-	+ 0,098	- 0,188	+ 0,154	+ 1,099	-	+ 0,000231	- 0,000442	+ 0,000362	+ 0,002585
Impala	-	+ 0,206	- 0,293	+ 0,548	+ 1,395	-	+ 0,000485	- 0,000689	+ 0,001289	+ 0,003281

*gal/mile = Galões por milha
 *l/km = Litros por quilômetros
 *1gal/mile = 2,3521 l/km

Fonte: (ROSS, 1980) – adaptado pelo autor

Analisando os resultados dos testes, os segmentos 1, 2, 4 e 5 (ou seja, do pavimento mais suave ao mais irregular), há um aumento progressivo (embora irregular) no consumo de combustível. O segmento 3 apresentou problemas analíticos pois para os três carros

usados nos testes, ele contraria o padrão de consumo de combustível indicado pelos outros locais e difere significativamente do local 4, embora os níveis de irregularidade medidos (Quadro 6) nos dois locais sejam bastante próximos (ROSS, 1980).

Pelo fato dados avaliados no segmento 3 resultarem divergentes aos demais, o autor os desconsiderou para gerar uma análise dos outros segmentos formulando a Equação (5) a seguir estimando o consumo de combustível conforme o aumento do IRI.

$$F_s = 0,43771 - 0.0001879 * PSI \quad (5)$$

Os valores de PVI convertido para valores IRI seguindo a equação (6) a seguir.

$$PSI = A * e^{-x(IRI-k)} \quad (6)$$

F_s = Consumo de Combustível em galões por milha (gal/mile);

PSI = Interação do Veículo de Pavimento;

IRI = Índice de Irregularidade Longitudinal expresso em metros por quilômetros (m/km)

A, x = Valores definidos conforme base de dados estatísticos PSI e IRI das seções experimentais;

k = Valor de ajuste do IRI conforme condições estipulados no Vietnã (utilizado apenas para estudos realizado sob condições rodoviárias do Vietnã).

Ao analisar os resultados (Quadro 7) Ross (1980) concluiu que, considerando as condições do pavimento dos segmentos estudados, ao variar o PSI de 4,4 a 0,9, o consumo de combustível de aumentou cerca de 3% nos veículos estudados. Contudo, percebeu que a variação de consumo de combustível não ocorre linearmente conforme a variação do PSI . Ao linearizar seu estudo, concluiu que ao variar o de PSI de 4,5 a 1,5 o consumo de combustível varia cerca de 1,5%. Considerando o estudo em termos de IRI , concluiu-se que, há uma variação de 0,4% no consumo de combustível para cada unidade de variação de IRI (m/km).

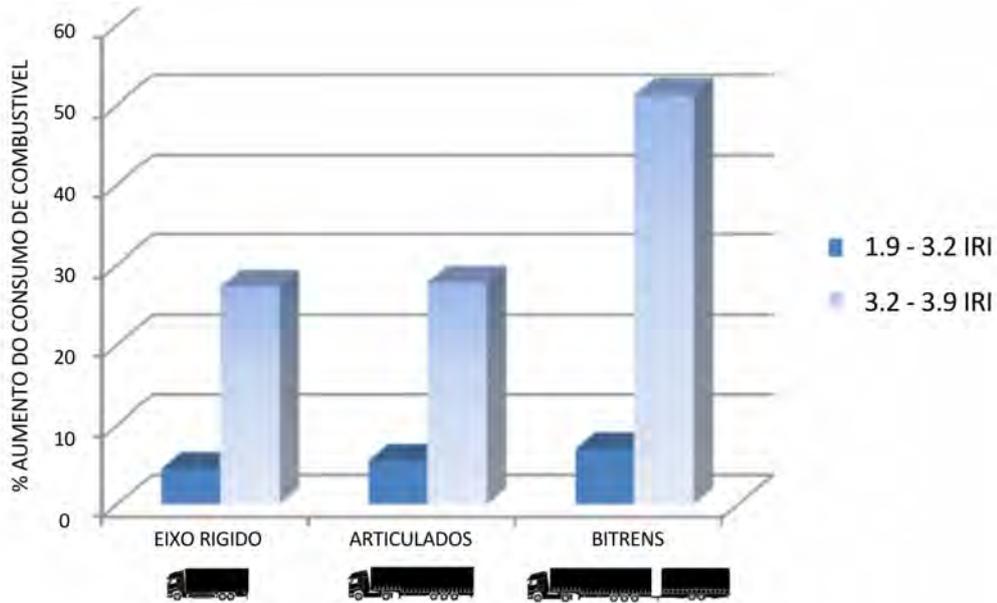
É importante salientar que o estudo é bastante datado em comparação com os padrões atuais, levando em consideração as mudanças na tecnologia dos veículos e no consumo de combustível ao longo do tempo. Apesar disso, o estudo é altamente relevante para o contexto em questão e foi elaborado de maneira coesa e detalhada servindo como molde para futuras avaliações do tema.

7.5 Thoresen (2004)

Focando seus estudos nos parâmetros da 3ª Determinação de Preços Rodoviários de Veículos Pesados da Comissão Nacional de Transportes australiana (NTC 3rd Heavy Vehicle Road Pricing Determination), Thoresen (2004) buscou avaliar o consumo de combustível para veículos pesados, sendo caminhões com eixo rígido, caminhões

articulados e caminhões bitrens frente a condição de rodovias ao analisar seu IRI com velocidade constante. Utilizando os parâmetros do Banco Mundial com o modelo HDM-4 adaptados aos parâmetros australianos realizou o estudo obtendo os resultados apresentados na Figura 20 a seguir.

Figura 21 – Consumo de combustível frente ao IRI para veículos pesados

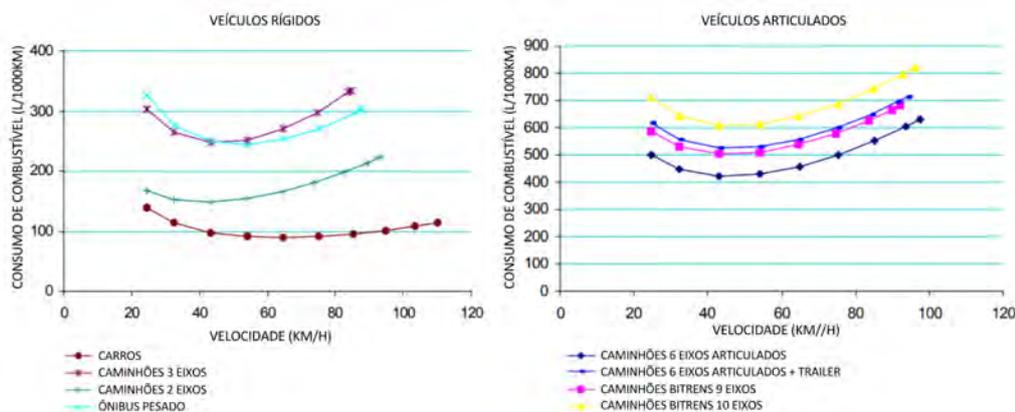


Fonte: (THORESEN, 2004) – adaptado pelo autor

Para uma faixa do IRI de 1,9 a 3,2, foi registrado um aumento no consumo de combustível de 4,5% para caminhões rígidos, 5,5% para caminhões articulados e 7% para caminhões bitrens. Já para uma faixa de IRI de 3,2 a 3,9 foi registrado um aumento no consumo de combustível bastante superior a faixa anterior, sendo de 27,3% para caminhões rígidos, 27,8% para caminhões articulados e 51,2% para caminhões bitrens. Vale lembrar que os resultados são para velocidades constantes e para os padrões veiculares australianos.

Após confirmar os resultados, Thoresen (2004) resolveu investigar a relação do Índice de Irregularidades Longitudinal (IRI) com o consumo de combustível correlacionado as velocidades variáveis. Em estudos anteriores foi verificada uma relação inversamente proporcional entre a velocidade do veículo e o IRI, pois como o IRI serve para estabelecer uma relação de conforto na interação veículo pavimento, os motoristas consequentemente reduzem a sua velocidade em rodovias mais irregulares (BOTTERILL, 1996 e 1997; THORESEN & ROPER, 1999). Contudo, sobre a relação velocidade vs consumo combustível, foi apontada uma relação inversamente proporcional para velocidades baixas e diretamente proporcional a contar de uma velocidade mais alta (THORESER & ROPER, 1999). Podemos verificar isso na Figura 22 a seguir.

Figura 22 – Consumo por velocidade de veículos rígidos (a) e articulados (b)



Fonte: THORESER & ROPER (1999) – adaptado pelo autor

Resumidamente, os estudos de Thoreser (2004) concluíram que para velocidades constantes, o consumo de combustível é aumentado devido ao Índice de Irregularidade Longitudinal (IRI). Contudo, frente a velocidades variáveis, não foi obtido um resultado consistente devido a relação velocidade vs consumo de combustível não ser linear. Ou seja, enquanto irregularidade longitudinal aumenta o consumo de combustível em qualquer velocidade dada, também reduz a velocidade de deslocamento do veículo, o que reduz o consumo de combustível por unidade de distância para a maioria das velocidades de deslocamento livre. O efeito dessas relações pode se compensar as vezes em determinadas velocidades não gerando aumento nem diminuições no consumo de combustível. Logo, para velocidades variáveis o aumento do consumo de combustível frente ao IRI pode ser considerado indeterminado. Ademais, o estudo de Thoreser (2004) também mostrou que veículos maiores e mais pesados, analisando os resultados expostos na Figura 20, podem ter um aumento exponencial em seu consumo de combustível frente ao IRI pois o crescimento do consumo de combustível para diferentes faixas de IRI foi drástico.

7.6 Outros Autores

No decorrer dos anos, diversos autores estudaram o consumo de combustível frente as condições do pavimento analisando o Índice Irregularidade Longitudinal de Pavimentos (IRI). Diferentes métodos foram usados para tentar quantificar o combustível gasto a mais pelos veículos ao percorrer rodovias em diferentes condições. Dentre os métodos utilizados, podemos citar a medição direta de combustível em diferentes segmentos com diferentes valores de IRI, medições de resistência ao rolamento e comparações estatísticas, aferição para trechos hipotéticos, entre outros. A Quadro 8 a seguir expressa um breve resumo de alguns autores que buscaram compreender melhor sobre o consumo de combustível frente

as condições de pavimento utilizando o IRI como parâmetro com seus respectivos resultados sobre os estudos e testes realizados.

Quadro 8 – Resumo de autores que estudaram o consumo de combustível frente ao IRI

FONTE	MÉTODO	INTERVALO IRI*	TIPO DE VEÍCULO	RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO (% DE VARIAÇÃO POR UNIDADE DE IRI)	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL (% DE MUDANÇA POR UNIDADE DE IRI)
Ross (1982)	Medição direta de combustível em diversas superfícies	0,5 - 3,7	Carro	-	0,4
Bestler (1984)	Resistência ao rolamento em diversas superfícies	1,4 - 5,5	Carro	2,6	0,5
Watanatada et al. (1987)	Resistência ao rolamento em diversas superfícies	2 - 14	Carro Caminhão	2,5 1,8	0,5 0,5
Jovens (1988)	Medição direta de combustível - rugosidade artificial. Medição direta de combustível - veículos lado a lado.	1,3 - 4,0	Caminhão	-	4,1
		3,3 - 5,6	Carro		3,1
		2,3 - 4,4	Carro		3,6
		1,7 - 5,7	Carro		0,8
Laganier & Lucas (1990)	Resistência ao rolamento em diversas superfícies	1 - 6**	Carro	-	1,2
Descornet (1990)	Resistência ao rolamento em diversas superfícies	0,8 - 7,7	Carro	4,0	0,8
Sandberg (1990)	Medição direta de combustível em diversas superfícies	1 - 6**	Carro		1,7
du Plessius, Visser & Curtayne (1990)	Resistência ao rolamento em diversas superfícies	1,2 - 1,5	Carro	3,4	0,7
			Caminhão	4,4	1,1
Delane (1994)	Medições direta de combustível em diversas superfícies	Rugosidade de curto comprimento de onda de 0,7 a 2,8 metros.***	Carro	-	até 6%
BTCE (1997)	Hipotético trecho rodoviário de 1km	1,2 - 5,8	Carro	-	0,9
			Caminhão Rígido		1,4
			Caminhão Articulado		0,9
Jamieson & Cenek (1999)	<i>Public Good Science Fund</i> - Contribuição para determinação do IRI	1,7 - 5,3	Caminhão	-	0,8
Epps et al. (2002), Sime e Ashmore (2000)	-	3,1 - 3,7	Caminhão	-	0,45
Jackson (2004)	-	3,1 - 3,7	Caminhão	-	0,13
Thoresen (2004)	HDM-4 calibrado para condições da Austrália	1,9 - 3,2 3,2 - 3,9	Caminhão Rígido	-	4,5 a 27,3
			Caminhão Articulado		5,5 a 27,8
			Caminhão Bitrem		7 a 51,2
Zaabar & Chatti (2010)	HDM-4 calibrado para condições do EUA	1 - 5	Carro (médio)	-	0,9
			Carro (SUV)		0,4
			Caminhão articulado		0,6
Ko et al. (2010)	Medições direta de combustível em diversas superfícies	3,56 - 3,59	Carro	-	0,21

** Intervalo estimado.

*** Não especificado no IRI.

Fonte: (McLEAN & FOLEY, 1998; GILLESPIE & McGHEE, 2007) – adaptado pelo autor

Ao analisar o Quadro 8 apresentado anteriormente, pode-se observar que diversos autores já avaliaram o consumo de combustível em relação à condição do pavimento. A maioria desses estudos focou na correlação entre o consumo de combustível e o IRI, enquanto outros utilizaram a resistência ao rolamento para determinar o consumo de combustível e após compararam com a variação do IRI (McLEAN & FOLEY, 1998; GILLESPIE & McGHEE, 2007).

Entre os métodos utilizados, é possível ver que estudos mais antigos oscilaram na avaliação do consumo de combustível entre medições diretas de combustível e medições de resistência ao rolamento. Talvez isso aconteça pelo fato de que a tecnologia empregada na época não serem tão avançadas quanto as atuais.

Os estudos mais aprofundados anteriormente foram selecionados devido à relevância de suas comprovações e métodos. Por exemplo, Ko et al. (2010) teve uma abordagem meramente experimental para avaliar o consumo de combustível em relação ao IRI nos segmentos estudados. Apesar de utilizar métodos menos aprofundados, seu estudo foi capaz de fornecer uma base quanto a medição do consumo de combustível gasta e modelo de equipamentos para futuros experimentos mais detalhados.

Ross (1980), por outro lado, realizou um experimento amostral com mais de 350 testagens descartando ainda os testes que sofreram interferências externas, diferente de Ko et al. (2010), que realizou apenas uma testagem para cada sentido do segmento estudado. Embora o experimento de Ross tenha sido realizado há algum tempo, com veículos que possuíam tecnologia automotiva defasada em comparação com a atual, seus métodos amostrais são muito pertinentes.

Outro estudo relevante é o de Thoresen (2004), que avaliou o consumo de combustível de veículos pesados em relação a diferentes índices de irregularidades longitudinais do pavimento. Da mesma forma que Ross (1980) e Ko et al. (2010), o estudo comprovou um aumento no consumo de combustível em relação à baixa qualidade do pavimento. No entanto, Thoresen (2004) constatou que seus resultados eram válidos apenas para velocidades constantes e que, para velocidades variáveis, seu estudo foi inconclusivo.

Visando estudos futuros, analisar o consumo de combustível para uma linha variada de velocidade frente a condição do pavimento, continuando a averiguação de Thoresen (2004), traria novas discussões e resultados pertinentes a gama de estudos que o tema possui. Ainda assim, conciliando os estudos de Ross (1980) com uma grande amostragem de estudo e Ko et al. (2010) com a medição do combustível gasto, iria gerar uma melhor percepção dos resultados.

8 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal, evidenciar a importância da identificação e análise de modelos de previsão de consumo de combustível correlacionado a diferentes condições de pavimento nas rodovias. Para isso, foi explanado sobre os conceitos e diretrizes envolvendo a temática como a origem dos combustíveis fósseis, a importância do transporte pelo modal rodoviário, além de apontar vários fatores que influenciam no aumento do consumo de combustível pelos veículos considerando que são importantes fatores que condicionam o aumento ou diminuição das emissões de CO₂.

Ao longo da literatura percebeu-se que as emissões de CO₂ aumentam proporcionalmente ao crescimento da malha rodoviária mundial. Isso deve-se aos combustíveis fósseis serem as principais fontes de combustíveis para o modal rodoviário. Com isso, o estudo visando entender mais sobre o quanto de combustível e o gasto no transporte de veículos correlacionado a condição do pavimento das rodovias é de suma importância uma vez que isso pode vir a alterar o percentual de emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera.

Ao analisar estudos presentes na literatura ficou constatado que conforme a irregularidade do pavimento cresce, o consumo de combustível também, gerando uma condição de proporcionalidade direta. Contudo, levando em conta todos os autores avaliados no texto, os estudos quanto a isso não possuem um parâmetro específico, tanto para a testagem quanto para a metodologia empregada para a avaliação. Sendo assim, os testes apresentam resultados distintos para diferentes métodos empregados.

Além disso, foi notado que os estudos, em quase sua totalidade, são realizados considerando velocidades constantes mesmo sabendo que as velocidades variam no decorrer do transporte. Isso se deve ao fato de que para velocidades variáveis a relação velocidade vs consumo de combustível é inversamente proporcional para velocidades baixas e diretamente proporcional a partir de uma velocidade mais alta. Afim de acrescentar conhecimento e valor ao tema, a linha de pesquisa fica aberta para futuros estudos.

Em resumo, a identificação e avaliação de modelos de previsão de consumo de combustível para diferentes condições rodoviárias apresentados neste estudo representam uma valiosa contribuição para a área ao fornecer uma percepção sobre a precisão e eficácia de vários modelos. Esta pesquisa é significativa para a comunidade acadêmica, pois tem o potencial de melhorar a eficiência energética dos veículos e reduzir a emissão de poluentes, promovendo assim a sustentabilidade ambiental. Além disso, os resultados deste estudo

podem ser utilizados pela indústria automotiva e pelo setor de transporte para otimizar o consumo de combustível e reduzir os custos operacionais.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBURQUERQUE, Vanessa Araújo Maia de; NOBRE JÚNIOR, Ernesto Ferreira. **Análise comparativa entre diferentes modelos de determinação de custo de operação de veículos.** 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/56290> Acesso em: 23 de fev. de 2023.

ALMEIDA, Matheus das Neves et al. **Predição do erro no comportamento ecológico dos motoristas em função das condições térmicas das cabines de ônibus urbano.** 2022. Disponível em: <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/30045> Acesso em: 23 de fev. de 2023.

ALMEIDA, Natália Maria Diniz Pereira. **Utilização de Ceiba Speciosa para sorção de combustíveis fósseis.** 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/8112> Acesso em: 10 de jan. de 2023.

ALVARENGA, Júlia França et al. **Avaliação dos impactos ambientais devido à implantação de um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo de troca de combustível.** 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/234872> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

AMBOS, G. J. **Procedimento de estimativa da velocidade de tráfego utilizado no modelo de planejamento rodoviário do NIMPAC.** Indian Roads Congress. 1983. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/197428> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

ARANGO ALVAREZ, Luisa Fernanda. **Análise de benefícios econômicos do emprego do transporte não motorizado (ciclovias) por meio do modelo HDM-4-estudo de caso para o município de São Paulo.** 2022. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-21112022-100511/en.php> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

ARASHIRO, Bruno Vasconcelos et al. **A importância do modal rodoviário de carga na economia brasileira 2010-2019.** 2022. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/21105> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

ARAÚJO, João Paulo da Costa. **Avaliação da sustentabilidade de estruturas e materiais de pavimentos rodoviários.** 2016. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/42547> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, projetos e restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de Concreto.** São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

BARAN, Renato. **A introdução de veículos elétricos no Brasil: avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade.** 2012. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/10634> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

BARBOSA, Bruno Vinicius de Almeida. **Custos operacionais associados à qualidade dos pavimentos rodoviários.** 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/214953> Acesso em: 23 de fev. de 2023.

BARELLA, Rodrigo Maluf. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais.** 2008. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-31032008-172407/publico/Tese_RodrigoMalufBarella_revisada_2008.pdf Acesso em: 02 de jan. 2023.

BARTHOLOMEU, Daniela Bacchi e CAIXETA FILHO, José Vicente. **Impactos econômicos e ambientais decorrentes do estado de conservação das rodovias brasileiras: um estudo de caso.** Revista de Economia e Sociologia Rural, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-20032008000300006>. Acesso em: 20 de dez. de 2022.

BASTOS, Ricardo Fagundes. **Potencial do sistema diesel elétrico para a redução do consumo de combustível fóssil em embarcações de pesca: um estudo de caso do consumo de energia da frota de espinhel de fundo do Rio de Janeiro.** 2019. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/doutorado/Tese_Final_Ricardo_PPE_2019.pdf Acesso em: 10 de jan. de 2023.

BEN-CHAIM, M., SHMERLING, E., & KUPERMAN, A.. *"Analytic Modeling of Vehicle Fuel Consumption"*. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en6010117> Acesso em: 28 de fev. de 2023.

BERNUCCI, Liedi B et al. **Pavimentação Asfáltica – formação básica para engenheiros.** 3ª ed. Rio de Janeiro: Imprinta, 2010.

BIFULCO, G. N. et al. *"Impact Evaluation of Advanced Driving Assistance"*. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su71014326> Acesso em: 28 de fev. de 2023.

BORGES, Raquel Rocha. **Estudo de dispersão atmosférica considerando o uso do gás liquefeito em veículos rodoviários de carga na cidade de São Paulo.** 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/100/100136/tde-03092021-113929/en.php> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

BRITTO, L. A. T.; DAWSON, Andrew R. **Método de dimensionamento para pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego.** Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Lelio-Brito/publication/266065648_METODOS_DE_DIMENSIONAMENTO_PARA_PAVIMENTOS_DE_RODOVIAS_DE_BAIXO_VOLUME_DE_TRAFEGO/links/56a7bc8e08aed2e36f8b8/METODOS-DE-DIMENSIONAMENTO-PARA-PAVIMENTOS-DE-RODOVIAS-DE-BAIXO-VOLUME-DE-TRAFEGO.pdf Acesso em: 28 de fev. de 2022.

BUTT, A. A, HARVEY, J., et al. *"Investigation of the Effect of Pavement Deflection on Vehicle Fuel Consumption: Field Testing and Empirical Analysis"*. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.7922/G2X34VRF> Acesso em: 24 de jan. de 2023.

CANEPPELE, Augusto Cezar Gessi. **Uma sequência didática facilitadora da aprendizagem significativa no estudo do efeito estufa e do aquecimento global.** 2019. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/211412> Acesso em: 24 de jan. de 2023.

CARMONA, Bruno de Souza; KASSAI, José Roberto. **A matriz energética brasileira: uma análise perante a NDC e o ODS7**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002952316> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

CASCETTA, E.. **Engenharia de sistemas de transporte: teoria e métodos**. Kluwer Editoras Acadêmicas, 2001.

CBIE – Centro Brasileiro de Infraestrutura e Energia. **Qual é o percentual de etanol e biodiesel nos combustíveis brasileiros?**. 2020. Disponível em: <https://cbie.com.br/qual-e-o-percentual-de-etanol-e-biodiesel-nos-combustiveis-brasileiros/> Acesso em: 05 de mar. de 2023.

CHATTI, K.; ZAABAR, I. “*Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operating Costs*”. Transportation research board. 2012.

CNT – Confederação Nacional de Transporte. **Boletins**. 2019. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/boletins> Acesso em: 20 de dez. de 2022.

CNT - Confederação Nacional de Transporte. **Somente 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada**. 2018. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/somente-12-da-malha-rodoviaria-brasileira-pavimentada> Acesso em: 20 de dez. de 2022.

CORNETTA, Andrei. **Ciência, política e a produção histórica do clima: considerações sobre controvérsias científicas e políticas para mudanças climáticas**. Revista da ANPEGE, 2022. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/anpege/article/view/13567> Acesso em: 24 de jan. de 2023.

DA SILVA, Simão Pereira et al. **A importância da biomassa na matriz energética brasileira**. Pensar Acadêmico, 2021. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/52c0/5be7a870f3cefc84c191088c6be7668bd06.pdf> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

DALPRÁ, Agostinho J. et al. **Experimentação planejada para análise dos fatores que influenciam os pontos ótimos de funcionamento de um motor de combustão interna**. 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/218503/TCC.pdf?sequence=5> Acesso em: 23 de fev. de 2023.

DAVIDSON, K.B., **Uma relação de tempo de viagem de fluxo para uso em Planejamento de Transporte**. Procedimentos Australian Road Research Board 3, 1966.

DE ALMEIDA MOREIRA, Luana et al. **Revisão bibliográfica sobre o modal de transporte rodoviário no Brasil**. Research, Society and Development, 2019. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/728> Acesso em: 20 de dez. de 2022.

DE ALMEIDA, Anderson Soares et al. **Hidrogênio, o combustível do futuro**. Diversitas Journal, 2019. Disponível em: https://diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/593 Acesso em: 10 de jan. de 2023.

DE ARAÚJO, Arney Rayol Moura; DE OLIVEIRA, Elane Conceição. **Análise do consumo de combustíveis do setor de transporte rodoviário no Brasil**. Revista Estudo & Debate, 2020. Disponível em: <http://univates.br/revistas/index.php/estudoedebate/article/view/2528> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

DE CARVALHO KLEIN, Frederico; PARREIRA, Alexandre Benetti; JÚNIOR, José Leomar Fernandes. **Avaliação dos Custos de Operação dos Veículos e do Tempo de Viagem em Função da Geometria das Rodovias**. Minerva, 2005. Disponível em: http://moodle.stoa.usp.br/file.php/1780/Artigo_LeomarHDMIV.pdf Acesso em: 28 de fev. de 2022.

DE LIMA, Renata Fortini et al. **A contribuição do urbanismo para a mitigação dos impactos ambientais causados pela queima dos combustíveis fósseis**. 2022. Disponível em: <http://revista.ugb.edu.br/ojs302/index.php/simposio/article/view/2500> Acesso em: 10 de jan. de 2023.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento. Diretoria Executiva**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro. 2003.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 062/2004-PRO: pavimento rígido – avaliação objetiva: procedimento**. Rio de Janeiro: IPR, 2004a.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 063/2004-PRO: pavimento rígido – avaliação subjetiva: procedimento**. Rio de Janeiro: IPR, 2004b.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentos Rígidos**. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro. 2005.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro. 2006.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de gerência de pavimentos**. Rio de Janeiro, 2011. (IPR. Publicação 745)

DE OLIVEIRA, Matheus Ferraz. **Análise comparativa de simulação numérica 1D e criação de um conceito veículo elétrico híbrido para redução do consumo de combustível segundo a norma NBR6601 US FTP75**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/RAOA-BCGJE2> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

DE OLIVEIRA, Rafael Cajano; JUNGER, Alex Paubel. **Utilização de combustíveis fósseis no Brasil e suas consequências ambientais**. Research, Society and Development, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/7537> Acesso em: 10 de jan. de 2023.

DE SOUSA REGALA, Paloma. **Turismo e aquecimento global: deslocamento dos turistas como fonte de impacto**. Editora Licuri, 2022. Disponível em: <https://editoralicuri.com.br/index.php/ojs/article/view/28> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

DE SOUZA BATISTA, Fani Tamires; DE OLIVEIRA CHAVES, Michele. Capítulo 4 **Combustíveis fósseis: tipos e combustão. meio ambiente e suas tecnologias**, 2021 Disponível em: https://www.academia.edu/download/67793644/Meio_ambiente_e_suas_tecnologias.pdf#page=147 Acesso em: 10 de jan. de 2023.

DEDINI, Franco Giuseppe. **Dinâmica Longitudinal de Veículos Pesados: Forças Resistivas e Outros Fatores de Influência no Consumo de Combustível**. 2020. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=472008> Acesso em: 23 de fev. de 2023.

DO NASCIMENTO, Estela Leal Chagas et al.. **História geológica da Terra: mesa redonda sobre aquecimento global e terraplanismo**. Terrae Didatica, 2020. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/td/article/view/8659651> Acesso em: 24 de jan. de 2023.

DONG, J., & HU, L.. “*Investigation of the Link Between Macroscopic Traffic Flow Characteristics and Individual Vehicle Fuel Consumption*”. 2017.

DOS SANTOS, Rodrigo Miguel et al. **Energia e sustentabilidade: panorama da matriz energética brasileira**. Scientia: Revista Científica Multidisciplinar, 2021. Disponível em: <https://www.revistas.uneb.br/index.php/scientia/article/view/9396> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

DOUANGPHACHANH, V. “*The development of a simple method for network-wide road surface roughness condition estimation and monitoring using smartphone sensors*”. 2014. Tokyo Metropolitan University. Tokyo, Japão, 2014.

ECRPD – “*Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation*”. Final report, Grant Agreement EIE, 2010. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/235007402.pdf> Acesso em: 24 de fev. de 2023.

EPA – Environmental Protection Agency. “*Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES), User Guide for MOVES2010a*”. 2010a.

EPA – Environmental Protection Agency. “*Technical Guidance on the Use of MOVES2010 for Emission Inventory Preparation in State Implementation Plans and Transportation Conformity*”. 2010b.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: [MATRIZ ENERGÉTICA \(epe.gov.br\)](https://www.epe.gov.br) Acesso em: 24 de jan. de 2023.

EPE Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031. **Demanda Energética do Setor de Transportes**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico->

[591/Caderno%20de%20Demanda%20de%20Transportes_PDE%202031_2022.02.09.pdf](#)
Acesso em: 20 de dez. de 2022.

EPE Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031. **Demanda e Eficiência Energética**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-591/Caderno%20de%20Efici%C3%Aancia%20e%20Demanda%20-%20PDE%202031.pdf#search=consumo%20de%20combustivel>. Acesso em: 07 de mar. de 2023.

ESTATISTICA. **Consumo de petróleo em todo o mundo de 1998 a 2021(em 1.000 barris por dia)**. Disponível em: [Consumo global de petróleo 2021 | Statista](#) Acesso em: 09 de fev. de 2023.

FERREIRA, Marcelo Dias Paes; VIEIRA FILHO, J. E. R. **Política de preços dos combustíveis. Diagnóstico e desafios da agricultura brasileira**. Rio de Janeiro: Ipea, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Marcelo-Ferreira-22/publication/337497905_POLITICA_DE_PRECOS_DOS_COMBUSTIVEIS/links/5ddc0941299bf10c5a3337a2/POLITICA-DE-PRECO-DOS-COMBUSTIVEIS.pdf Acesso em: 10 de jan. de 2023.

FERREIRA, Clovis Madruga. **Trabalhando com Viga Benkelman**. Disponível em: https://silo.tips/queue/deflectometria-da-sub-base-de-macadame-seco-deflectometria-da-base-granular-defl?&queue_id=-1&v=1678313829&u=MjgwNDozMGM6ZTA3OmZhMDA6MTAyYTplZGRkOmUzZDQ6M2YwZA== Acesso em: 08/03/2023

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002.

GASPARIN, Fernanda Bach. **A Influência de Políticas Públicas para o Progresso da Geração Solar Fotovoltaica e Diversificação da Matriz Energética Brasileira**. Revista Virtual de Química, v. 14, n. 1, 2022. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/4250> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GLOBO. **Valor econômico: Estimativa de vendas de combustíveis no Brasil**. 2022 - Disponível em: <https://valor.globo.com/brasil/noticia/2021/11/17/retomada-de-combustivel-so-em-2022.ghtml> Acesso em: 24 de jan. de 2023.

HALLIDAY, D.; WALKER, J.; RESNICK R. **Fundamentos de Física**. 8. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HAMMARSTRÖM, U., KARLSSON, B. (1987) *VETO: ett datorprogram för beträkning av transportkostnader som funktion av vägstandard*". VTI meddelande 501.

HARVEY, J. (2012) *"LCA and rolling resistance"*, Disponível em: <http://miriam-co2.net/Publications/> Acesso em: 14 de fev. de 2023.

IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. **Projeção da demanda global de petróleo no longo prazo**, 2022. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/projecao-da-demanda-global-de-petroleo-no-longo-prazo/> Acesso em: 07 de fev. de 2023

IERD. “*Integration of the Measurements of Energy Usage into Road design*”, 2002.

ILOS - Especialistas em Logística e Supply Chain. **Matriz de transportes do Brasil à espera dos investimentos**, 2020. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/tag/matriz-de-transportes/> Acesso em: 20 de dez. de 2022.

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*. **Mudança do Clima 2021, A Base Científica - Sumário para Formuladores de Políticas**. 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf Acesso em: 12 de mar. de 2023

J.P. ZANIEWSKI, et al. “*Vehicle operating costs, fuel consumption, and pavement type and condition factors*”. Relatório Especial da FHWA, Federal Highway Administration, 1982. Disponível em: <https://scholar.google.com/scholar?q=Vehicle%20Operating%20Costs,%20Fuel%20Consumption,%20and%20Pavement%20Type%20and%20Condition%20Factors>, Acesso em: 23 de fev. de 2023.

JACINTO, Bárbara Costa et al. **Inovação e logística: o compartilhamento de frota para o segmento de transporte rodoviário de cargas Luth Transportes**. 2022. Disponível em: Acesso em: 09 de fev. de 2023.

JARDIM, Luciana Suman. **Inventário de consumo de combustível, estimativa de emissão de CO2 por Monte Carlo das embarcações petroleiras, graneleiras e contêineres que operam no Brasil**. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, 2020. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/9201 Acesso em: 09 de fev. de 2023.

JARDINE, J. G. et al. **Transferência e disponibilização de informações sobre tecnologia em agroenergia: árvore do conhecimento agroenergia**. 2011. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/48188/1/v28n1-3p327.pdf> Acesso em: 09 de mar. de 2023.

JARROUGE, Ana et al. **Gestão de frotas com foco na economicidade dos recursos em empresas de transporte rodoviário no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/576> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

JUNGES, Alexandre Luis. **Aquecimento global: uma questão sociocientífica a ser discutida na formação de professores de física da educação básica**. 2019. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/194660> Acesso em: 24 de jan. de 2023.

JUNIOR, Adalberto Santana Lima et al. **Gases estufa e aquecimento global: uma proposta de ensino de polaridade de ligações com base na pedagogia histórico-crítica**. Scientia Naturalis, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufac.br/index.php/SciNat/article/view/5751> Acesso em: 24 de jan. de 2023.

KLEIN, Frederico de Carvalho. **Análise da influência de características geométricas de rodovias nos custos dos usuários utilizando o programa HDM-4**. 2005. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-11122006-161658/en.php> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

KROSCH, A. D. **Experiências com NIMPAC e implicações de padrões alternativos para rodovias rurais em Queensland**. 1980. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/163063> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

KROSCH, A. D. **Experiências com NIMPAC e implicações de padrões alternativos para rodovias rurais em Queensland**. 1980. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/163063> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

LEANDRO, Rodrigo Xavier. **Influência da textura dos pavimentos e diferentes tipos de pneus na resistência ao rolamento**. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/33071> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

LEME, Fernão Nonemacher Dias Paes. **Pavimentos de Concreto: Uma escolha sustentável para cidades**. 2021. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1AAufCdahyZPhhPv96MndW5G-sRaomx1D/view> Acesso em: 11 de mar. de 2023.

LOPES, Gustavo Francelino de Sousa et al. **Avaliação das oportunidades e desafios do uso de veículos elétricos no transporte rodoviário de cargas**. 2022. Disponível em: <http://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/10024> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

LOUHGHALAM, A., AKBARIAN, M., & ULM, F.. *“Carbon management of infrastructure performance: Integrated big data analytics and pavement-vehicle-interactions”*. Journal of Cleaner Production. Retrieved. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.198> Acesso em: 20 de mar. de 2023

MACK, J. et al. *“Overview of pavement-vehicle interaction related research at the mit concrete sustainability hub”*. 2017. Disponível em: <https://cshub.mit.edu/sites/default/files/documents/MIT%20PVI%20Summary-v5-Final.pdf> Acesso em: 11 de mar. de 2023.

MARQUES, Luiz et al. **O Antropoceno como aceleração do aquecimento global**. Liinc em Revista, 2022. Disponível em: <https://revista.ibict.br/liinc/article/view/5968> Acesso em: 24 de jan. de 2023.

McLEAN, J. & FOLEY, G.. *“Road surface characteristics and condition: effects on road users, research report”*. 1998. 314, ARRB Transport Research, Vermont South, Vic.

MOLION, Luiz Carlos Baldicero. **Aquecimento global antropogênico: uma história controversa**. Khronos, 2021. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/khronos/article/view/187979> Acesso em: 24 de jan. de 2023.

MORAES, Marcella Felicio et al. **As dificuldades de acesso do modal rodoviário no Porto de Santos e os impactos evidentes na malha de transporte**. 2020. Disponível em: <https://scholar.archive.org/work/trgdywopeneenflegjbidu5opi/access/wayback/https://www.po>

https://repositorio.ufu.br/livros/individuais/Supply_Chain/volume1/Supply_Chain_Portos_Voll.pdf#page=52 Acesso em: 09 de fev. de 2023.

MOURA, Fernanda Veronez Galdiano. **A importância do etanol brasileiro no contexto de mitigação das mudanças climáticas.** 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/35679> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

MOURA, Natã Balssan et al. **Estratégias para redução do consumo de combustível em tratores agrícolas com a otimização do desempenho em tração.** 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/27087> Acesso em: 23 de fev. de 2023.

NEGRELLO, Douglas Pacheco et al. **Os impactos da implantação do trabalho intermitente no transporte rodoviário.** 2022. Disponível em: <https://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/565> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

NICOLAU, Olivia Nascimento Boldrini et al. **Avaliação do consumo energético e emissões de dióxido de carbono do transporte rodoviário do Brasil (2016-2026).** Desenvolvimento e Meio Ambiente, 2020. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/view/62606> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

ODOKI, J. B. *A Tool for Investigating Road Investment Choices.* Inglaterra, 2015.

OLIVEIRA, Filipe Dottori de. **Análise de viabilidade do uso de biogás nas frotas de caminhões de coleta de lixo urbano no Rio de Janeiro.** 2022. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/16506> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

OLIVEIRA, Marcos Gabriel Nunes de et al. **Impactos causados pelo uso dos combustíveis fósseis e o uso do biocombustível como solução viável.** 2021. Disponível em: <http://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/6774> Acesso em: 10 de jan. de 2023.

OLIVEIRA, Victor Cardoso et al. **Avaliação da relação entre a condição de superfície de pavimentos e o padrão de emissão de poluentes atmosféricos.** 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/56439> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

OLIVEIRA FILHO, José Abner et al. **Obtenção Da Irregularidade Longitudinal Em Pavimento.** IBRACON, 2019.

PENTEADO, Gabrielle da Conceição Marques. **Modais de transporte e sua importância no avanço da logística.** 2021. Disponível em: <http://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/10787> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

PEREIRA, Nuno Gonçalo Sousa. **Análise sobre a utilização de biodiesel em veículos rodoviários equipados com tecnologias avançadas de controlo de emissões.** 2020. Disponível em: <https://iconline.ipleiria.pt/handle/10400.8/5213> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

PIMENTEL SILVA DE ALMEIDA, Caio. **O futuro do combustível renovável para a aviação comercial.** 2022. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/24159> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

PIRES, Bernardo Cascão et al. **Metodologia para avaliação do impacto do sobrepeso nos custos da manutenção rodoviária.** Disponível em: http://www.anpet.org.br/anais/documentos/2019_old/Infraestrutura/Dimensionamento,%20Avaliacao%20e%20Gestao%20de%20Pavimentos%20V/6_510_AC.pdf Acesso em: 28 de fev. de 2022.

PNL – Plano Nacional de Logística. **Relatório Executivo.** 2018. Disponível em: https://ontl2.epi.gov.br/html/objects/downloadblob.php?cod_blob=5835 Acesso em: 20 de dez. de 2022.

QUINTANILHA, Wendy Fernandes Lavigne et al. **Análise das emissões de co2 em vias urbanas com diferentes classificações funcionais: um estudo para Fortaleza–CE.** 2022 - Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Bruno-Bertoncini/publication/357604763_ANALISE_DAS_EMITSOES_DE_CO2_EM_VIAS_URBANAS_COM_DIFERENTES_CLASSIFICACOES_FUNCIONAIS_UM_ESTUDO_PARA_FORTALEZA_-CE/links/61d5e41fda5d105e551d9879/ANALISE-DAS-EMISSOES-DE-CO2-EM-VIAS-URBANAS-COM-DIFERENTES-CLASSIFICACOES-FUNCIONAIS-UM-ESTUDO-PARA-FORTALEZA-CE.pdf Acesso em: 23 de fev. de 2023.

REIS, Julia Araujo dos. **Impactos dos subsídios aos combustíveis fósseis: impostos sobre carbono e desdobramentos no Brasil.** 2019. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/handle/11600/51879> Acesso em: 10 de jan. de 2023.

RODRIGUES, Lucas. **Ensaio sobre a situação econômica da indústria sucroenergética e o consumo de combustíveis leves no Brasil.** 2020. Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11132/tde-12042021-144703/en.php> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

RUSCHEL, Davi Michel; HENKES, Jairo Afonso. **Uma análise da inserção de aeronaves movidas a energias renováveis nas escolas de aviação.** Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas, 2021. Disponível em: <https://rbaccia.emnuvens.com.br/revista/article/view/33> Acesso em: 23 de fev. de 2023.

SALVO JUNIOR, Orlando de. **Medição on-board das emissões de CO2 por meio do consumo energético monitorado via unidade de controle de veículo flex.** 2022. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-14012021-173304/?gathStatIcon=true> Acesso em: 23 de fev. de 2023.

SANTANA, Douglas de Lima et al. **Motorista 4.0: o papel social e profissional do motorista na geração de valor para clientes e construção de vantagem competitiva para empresas do setor de transporte rodoviário.** 2021. Disponível em: <https://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/518> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

SANTOS, Bertha et al. **Custos dos Utentes das Estradas na Gestão da Conservação de Pavimentos Rodoviários: o Caso da Rede Rodoviária Nacional.** 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Luis-Picado-Santos/publication/275041786_Custos_dos_Utentes_das_Estradas_na_Gestao_da_Conservacao_de_Pavimentos_Rodoviaros_o_Caso_da_Rede_Rodoviaria_Nacional/links/553124dc0ef20ea0a0715822/Custos-dos-Utentes-das-Estradas-na-Gestao-da-Conservacao-de-Pavimentos-Rodoviaros-o-Caso-da-Rede-Rodoviaria-Nacional.pdf Acesso em: 28 de fev. de 2022.

SANTOS, Bertha et al. **Análise e Aplicação de um Modelo de Custos dos Utentes Simplificado para a Rede Rodoviária Portuguesa**. XV CILA-Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto, 2020. Disponível em: https://www.academia.edu/download/42676564/Definio_Anlise_e_Aplicao_de_um_Modelo_de20160214-17704-ijdwbe.pdf Acesso em: 28 de fev. de 2023.

SATO, Minailli Harumi Neves et al. **O Papel das energias renováveis no desenvolvimento econômico sustentável**. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/5029>. Acesso em: 20 de dez. de 2022.

SATO, Minailli Harumi Neves et al. **O Papel das energias renováveis no desenvolvimento econômico sustentável**. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/5029> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

SAYERS, M. W.; KARAMIHAS, S. M. (1998) “*The Little Book of Profiling*”. University of Michigan. Disponível em: <http://www.umtri.umich.edu/content/LittleBook98R.pdf>. Acesso em dezembro de 2014.

SCHAPPO, Fillipe; FERREIRA, Denize Demarche Minatti; BELLEN, H. M. V. **Pesquisa e Desenvolvimento (P&D): Investimentos realizados pelas empresas brasileiras geradoras de energia e sua relação com a matriz energética**. 21 USP International Conference in Accouting, 2021. Disponível em: <https://congressosp.fipecafi.org/anais/21UspInternational/ArtigosDownload/3446.pdf> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

SCHMIDT, B. (2010) “*Project plan MIRIAM Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management Systems*”. Road directorate Denmark. 2010.

SCHYRA, Lukas. **Diversificação dos modais de transporte no Brasil**. ARTEFACTUM-Revista de estudos em Linguagens e Tecnologia, 2019. Disponível em: <http://www.artefactum.rafrom.com.br/index.php/artefactum/article/view/1802> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

SOARES, Tiago Ribeiro Espíndola; DE ASSIS RANGEL, João José. **Emissões de co2 e o potencial de expansão dos combustíveis fósseis nos BRICS**. Revista Produção e Desenvolvimento, 2022. Disponível em: <https://revistas.cefet-rj.br/index.php/producaoedesarrollo/article/view/603> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

STANNARD, E. et al. “*Volume Three: Software User Guide*”. Highway Development & Management Series, International Study of Highway Development and Management Tools, Birmingham. 2016.

STARKE, Allan Ricardo et al. **Análise exergoeconômica de uma central de concentração solar de coletores cilindro-parabólicos hibridizada com combustível fóssil e sistema fotovoltaico**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/215314> Acesso em: 10 de jan. de 2023.

TADIC, Katarina; GLAVIC, Drazenko. “*The analysis of fuel consumption models: A review and assessment*”. Journal of Road and Traffic Engineering, 2019. Disponível em: <https://www.putisaobraaj.rs/index.php/PiS/article/view/67> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

TAN, F., THORESEN, T., & EVANS, C. (2012). **Revisão dos custos operacionais dos veículos e da rugosidade das estradas: Passado, atual e futuro**. 25a Conferência ARRB, Perth Austrália, 2012. Disponível em: <http://155.212.5.248/Presto/content/GetDoc.axd?ctID=MjE1ZTI4YzctZjc1YS00MzQ4LTkyY2UtMDJmNTgxYjg2ZDA5&rID=MzlyOA==&pID=MTQ3Ng==&attchmnt=True&uSesDM=False&rIdx=MTM1NjQ=&rCFU=> Acesso em: 13 de mar. de 2023.

TAYRA, Flávio Tayra; DOS REIS, Julia Araujo. **impactos dos subsídios aos combustíveis fósseis: impostos sobre carbono e desdobramentos no Brasil**. Revista Contexto Geográfico, 2020. Disponível em: <https://www.seer.ufal.br/index.php/contextogeografico/article/view/11587> Acesso em: 20 de dez. de 2022.

THORESEN, T. **Documento de discussão sobre os custos operacionais dos veículos pesados de mercadorias: relatório preparado para a revisão NAASRA do estudo dos limites dos veículos rodoviários**. 1985. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/1193823> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

THORESEN, T.; EVANS, S. **Atualização dos valores dos parâmetros económicos a utilizar no modelo de ordenamento do território NIMPAC: valores unitários em 31 de Março de 1981 e 1982. 1982**. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/1190324> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

THORESEN, Thorolf. **Atualização dos valores dos parâmetros económicos a utilizar no nimpac e nos modelos conexos de planeamento e avaliação rodoviária: valores unitários em dezembro de 1988**. 1989. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/306373> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

TORROBA, M. Augustín. **Atlas dos biocombustíveis líquidos**. 1989. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/306373> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

UBRABIO. **Biodiesel, o melhor combustível do Brasil**. 2014. Disponível em: <https://ubrablo.com.br/2016/06/14/biodiesel-o-melhor-combustivel-do-brasil-2/> Acesso em: 24 de jan. de 2023.

VIEIRA, Anderson Nunes De Carvalho et al. **Uma reflexão da importância do modal rodoviário na economia de Mato Grosso no período de 1979 a 2020**. Revista Brasileira de Transportes, 2022. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/rbt/article/view/85571> Acesso em: 09 de fev. de 2023.

WAIDYATHILAKA, Erangi et al. **“Minimizing Carbon Footprint from Road Freight Transportation: A Systematic Review of Literature”**. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Erangi-Waidyathilaka/publication/334785432_Minimizing_Carbon_Footprint_from_Road_Freight_Transportation_A_Systematic_Review_of_Literature/links/5d4167ab299bf1995b597c30/Minimizing-Carbon-Footprint-from-Road-Freight-Transportation-A-Systematic-Review-of-Literature.pdf Acesso em: 28 de fev. de 2022.

WATANATANA, T. et al. *“The highway design and maintenance standards models. Highway Design and Maintenance Standards Series. 2v”* Maryland: The Johns Hopkins University Press. 1987.

WANG, T. Lee, I-S, KENDALL, A., HARVEY, J., LEE, E-B, KIM, C. (2012) *“Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance”*. Journal of Cleaner Production, 2012.

WERLANG, Raphael Brum. **A Física Dos Pneumáticos**. 2013. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~lang/Textos/Pneus.pdf> Acesso em: 07 de fev. 2023.

WIEDERKEHR, Fabiane. **Aquecimento global entre o fato e o “fake”: uma história dos eventos climáticos e estratégias para a gestão dos seus efeitos**. 2019. Disponível em: <http://conferencia.uergs.edu.br/index.php/IXSIEPEX/IXSIEPEX/paper/view/3959> Acesso em: 24 de jan. de 2023.

XAVIER, Reinaldo S. et al. **Heurística para modelagem e minimização do consumo de combustível para rotas de coleta de lixo**. 2010. Disponível em: <http://din.uem.br/sbpo/sbpo2010/pdf/72338.pdf> Acesso em: 28 de fev. de 2022.

XIAOXIA, L.; KIRO, M.; JIANMING, L. *“Influence of Pavement Deflection on Fuel Consumption of Heavy Trucks”*. International Journal of Transportation Science and Technology. 2015.

Zhou, F.; Turos, M.; Harvey, J. T.; Wood, E. *“Influence of Pavement Surface Texture on Fuel Consumption and CO2 Emission of Light-Duty Vehicles”*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2015.