



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MATHEUS CAVALCANTI DE MOURA FERRAZ

**COMPARAÇÃO ENTRE UM AUTOMÓVEL HÍBRIDO E UM  
CONVENCIONAL, RELACIONANDO ASPECTOS CINEMÁTICOS,  
ENERGÉTICOS E FINANCEIROS.**

Recife  
2023

MATHEUS CAVALCANTI DE MOURA FERRAZ

**COMPARAÇÃO ENTRE UM AUTOMÓVEL HÍBRIDO E UM CONVENCIONAL,  
RELACIONANDO ASPECTOS CINEMÁTICOS, ENERGÉTICOS E FINANCEIROS.**

Monografia submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, para conclusão do curso de Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Guilherme Medeiros Soares De Andrade

Recife  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Ferraz, Matheus Cavalcanti de Moura.

Comparação entre um automóvel híbrido e um convencional, relacionando aspectos cinemáticos, energéticos e financeiros / Matheus Cavalcanti de Moura Ferraz. - Recife, 2023.

61 p

Orientador(a): Guilherme Medeiros Soares de Andrade

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2023.

1. Sistema Híbridos. 2. Toyota Corolla Cross. 3. Eficiência Energética. 4. Comparativo Cinemático. 5. Análise Financeira. I. Andrade, Guilherme Medeiros Soares de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

MATHEUS CAVALCANTI DE MOURA FERRAZ

**COMPARAÇÃO ENTRE UM AUTOMÓVEL HÍBRIDO E UM CONVENCIONAL,  
RELACIONANDO ASPECTOS CINEMÁTICOS, ENERGÉTICOS E FINANCEIROS.**

Monografia submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, para conclusão do curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 28/09/2023

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 GUILHERME MEDEIROS SOARES DE ANDRADE  
Data: 17/10/2023 09:12:03-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Guilherme Medeiros Soares de Andrade (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente  
 MARCUS COSTA DE ARAUJO  
Data: 17/10/2023 09:06:20-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Marcus Costa de Araújo (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente  
 MAURICIO PEREIRA MAGALHAES DE NOVAES SA  
Data: 12/10/2023 14:55:28-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Me. Maurício Pereira Magalhães de Novaes Santos (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente  
 FERNANDO WESLEY CAVALCANTI DE ARAUJO  
Data: 12/10/2023 23:27:58-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. Fernando Wesley Cavalcanti de Araújo (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de aproveitar este momento para agradecer a todos que contribuíram para o sucesso deste trabalho de conclusão de curso. Em especial, gostaria de agradecer aos meus pais, minha namorada e toda a família, que sempre me apoiaram e me incentivaram em minha jornada acadêmica.

Agradeço também a Deus por me guiar e me iluminar em todos os momentos desta caminhada.

Não poderia deixar de mencionar o papel fundamental do meu orientador, Prof. Guilherme Medeiros Soares De Andrade, que com sua orientação, paciência e conhecimento contribuiu significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Também quero agradecer a todos os professores e amigos da faculdade que compartilharam seus conhecimentos e experiências, e que me ajudaram a crescer como estudante e como pessoa.

Novamente, agradeço a todos que contribuíram para este trabalho, e que me ajudaram a alcançar mais uma etapa importante em minha vida acadêmica.

*“Se você quer chegar onde a maioria não chega, faça o que a maioria não faz.”*  
*(Autor: Bill Gates)*

## RESUMO

Neste estudo, foram realizadas avaliações minuciosas nos veículos Corolla Cross nas versões XRX 1.8 híbrida e XRE 2.0 flex a fim de determinar se a versão híbrida é uma opção viável do ponto de vista econômico. Essas avaliações abrangem a análise cinemática, avaliação energética, a fim de medir a eficiência dos motores, e análise financeira. Para isso, foi realizada uma série de testes de desempenho em um circuito pré determinado, tanto em ambientes urbanos quanto rodoviários, além de serem submetidos a cenários sem engarrafamento, como é possível encontrar durante o final de semana, e horários de tráfego intenso, avaliando o desempenho e eficiência de ambos os veículos em situações variadas. A coleta de dados foi efetuada a partir do aplicativo Speed Tracker, o qual rastreia o percurso e gera dados importantes, como tempo, velocidade, latitude e longitude. Após esta etapa da pesquisa, os resultados foram submetidos a uma análise cinemática pré estabelecida, tendo como finalidade formular gráficos e tabelas para facilitar a compreensão das diferenças entre as versões do veículo. A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que a escolha entre os dois tipos de veículos depende fortemente das necessidades e preferências individuais do motorista. Dito isto, é importante destacar que, à medida que a tecnologia automotiva continua a evoluir, é fundamental manter-se atualizado sobre as últimas inovações para tomar uma decisão informada que atenda às suas necessidades de mobilidade e sustentabilidade.

**Palavras-chaves:** *Sistema Híbridos*, Toyota Corolla Cross, Eficiência Energética, Comparativo Cinemático, Análise Financeira

## ABSTRACT

In this study, thorough evaluations were conducted on the Corolla Cross vehicles in the XRX 1.8 hybrid and XRE 2.0 flex versions in order to determine if the hybrid version is a viable option from an economic perspective. These assessments encompassed kinematic analysis, energy assessment to measure engine efficiency, and financial analysis. To achieve this, a series of performance tests were conducted on a predetermined circuit, both in urban and highway environments, and were subjected to scenarios with and without traffic congestion, as can be encountered during the weekend and during peak traffic hours, evaluating the performance and efficiency of both vehicles in varied situations. Data collection was performed using the Speed Tracker app, which tracks the route and generates important data such as time, speed, latitude, and longitude. After this stage of the research, the results were subjected to a pre-established kinematic analysis, aiming to formulate graphs and tables to facilitate understanding of the differences between the vehicle versions. Based on the obtained results, it can be concluded that the choice between the two types of vehicles strongly depends on the individual needs and preferences of the driver. With that said, it is important to highlight that as automotive technology continues to evolve, it is crucial to stay updated on the latest innovations to make an informed decision that meets your mobility and sustainability needs.

**Key-words:** Hybrid Systems, Toyota Corolla Cross, Energy Efficiency, Kinematic Comparison, Financial Analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Primeiro Automóvel Patentado - Benz Patent Motorwagen. . . . .	12
Figura 2 – Toyota Prius dos anos 2000. . . . .	14
Figura 3 – Corolla Cross XRE 2.0 flex e nas suas versões XRX 1.8 híbrida. . .	15
Figura 4 – Motor ciclo Diesel . . . . .	16
Figura 5 – Ciclo Otto 4 tempos. . . . .	17
Figura 6 – Gráfico Pressão X Volume do Ciclo Otto. . . . .	18
Figura 7 – Motor de Ciclo Atkinson do Corolla Cross híbrido . . . . .	19
Figura 8 – Funcionamento do conjunto de motorização do Honda Civic. . . . .	23
Figura 9 – Percurso estrada. . . . .	33
Figura 10 – Percurso cidade. . . . .	34
Figura 11 – Dados expostos no excel . . . . .	35
Figura 12 – Teste 1 estrada Cross 2.0 XRE . . . . .	39
Figura 13 – Teste 2 estrada Cross 2.0 XRE . . . . .	40
Figura 14 – Gráfico 50 a 110 Km/h do teste 2 no Cross 2.0 XRE . . . . .	41
Figura 15 – Teste 1 estrada no Cross 1.8 XRX Híbrido . . . . .	41
Figura 16 – 50 a 120 Km/h do teste 1 no Cross 1.8 XRX Híbrido . . . . .	42
Figura 17 – Comparativo do 0 a 100 Km/h . . . . .	43
Figura 18 – Teste 1 no Cross 2.0 XRE . . . . .	45
Figura 19 – Teste 2 no Cross 2.0 XRE . . . . .	45
Figura 20 – Teste 1 no Cross 1.8 XRX . . . . .	46
Figura 21 – Teste 2 no Cross 1.8 XRX . . . . .	46
Figura 22 – Teste 1 consumo estrada Cross 2.0 XRE . . . . .	48
Figura 23 – Teste 2 consumo estrada Cross 2.0 XRE . . . . .	49
Figura 24 – Teste 1 consumo estrada Cross 1.8 XRX . . . . .	50
Figura 25 – Teste 1 consumo cidade Cross 2.0 XRE . . . . .	51
Figura 26 – Teste 2 consumo cidade Cross 2.0 XRE . . . . .	51
Figura 27 – Teste 1 consumo cidade Cross 1.8 XRX . . . . .	52
Figura 28 – Teste 2 consumo cidade Cross 1.8 XRX . . . . .	53
Figura 29 – Valor da tabela fiipe do Corolla Cross 2022 XRE . . . . .	54
Figura 30 – Valor da tabela fiipe do Corolla Cross 2022 XRX Híbrido . . . . .	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de caracterização dos ciclos desenvolvidos . . . . .	36
Tabela 2 – Dados da simulação no circuito estrada . . . . .	44
Tabela 3 – Dados da simulação no circuito cidade com trânsito . . . . .	47
Tabela 4 – Dados da simulação no circuito cidade sem trânsito . . . . .	47
Tabela 5 – Tabela comparativa com os valores das revisões . . . . .	54
Tabela 6 – Custo mensal de combustível para um uso 50% estrada e 50% cidade	56
Tabela 7 – Custo mensal de combustível para um uso 30% estrada e 70% cidade	56
Tabela 8 – Custo mensal de combustível para um uso 70% estrada e 30% cidade	56
Tabela 9 – Payback . . . . .	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MHEV	Híbrido Leve
HEV	Híbrido Convencional
PHEV	Híbrido Plug-in
REEV	Elétrico "Sujo"
XRE	Versão sem auxílio de motores elétricos do Corolla Cross 2022
XRX	Versão Híbrida do Corolla Cross 2022
IPVA	Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
PC	Parâmetros de caracterização

## SUMÁRIO

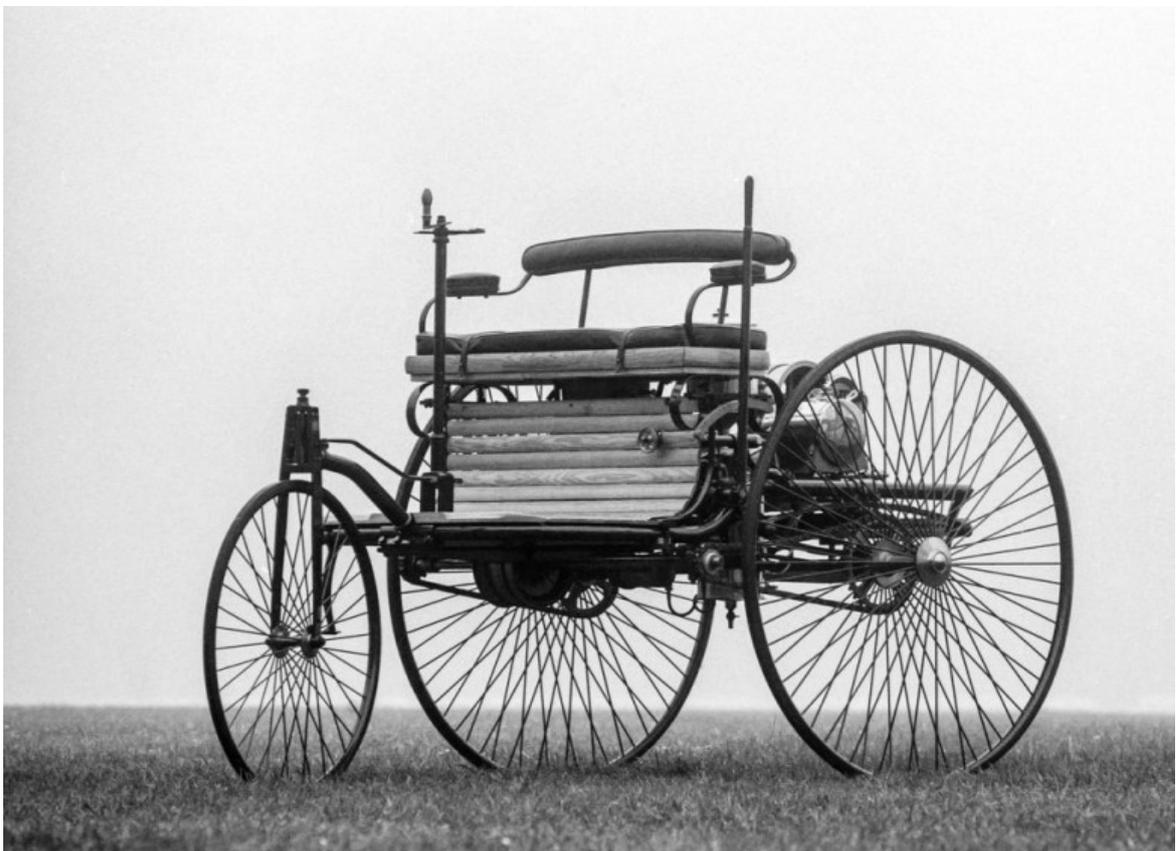
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Objetivos	14
1.1.1	<i>Objetivos específicos</i>	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
2.1	Tipos de ciclos nos motores a combustão	16
2.2	Tipos de veículos híbridos	20
2.2.1	<i>MHEV: O Híbrido Leve:</i>	20
2.2.2	<i>HEV: O Híbrido Convencional:</i>	21
2.2.3	<i>Variações de um Híbrido Convencional:</i>	22
2.2.4	<i>PHEV: O Híbrido Plug-in:</i>	23
2.2.5	<i>REEV: O Elétrico Sujo</i>	24
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>26</b>
3.1	Avaliação da demanda	28
3.2	Análises financeiras	29
3.3	Análises sociais	30
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>32</b>
4.1	Seleção dos Carros e Versões	32
4.2	Circuitos de Teste	32
4.3	Coleta de dados	34
4.3.1	<i>Ferramenta SpeedTracker</i>	34
4.3.2	<i>Forma de colhimentos dos dados</i>	34
4.4	Análise de Resultados	35
4.5	Análise de Consumo	37
4.6	Análise de Custos	37
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>39</b>
5.1	Testes cinemáticos	39
5.1.1	<i>Percurso estrada</i>	39
5.1.2	<i>Percurso cidade</i>	44
5.2	Testes de consumo	48
5.2.1	<i>Percurso estrada</i>	48
5.2.2	<i>Percurso cidade</i>	50
5.3	Custos	53

5.3.1	<i>Custos com revisões periódicas</i> . . . . .	53
5.3.2	<i>Desvalorização</i> . . . . .	54
5.3.3	<i>Custo com combustível</i> . . . . .	55
5.3.4	<i>Payback</i> . . . . .	57
6	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> . . . . .	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O automóvel é um dos maiores avanços tecnológicos da humanidade, e sua invenção foi um marco na história. O primeiro automóvel movido a gasolina foi inventado em 1885 por Karl Benz (Figura 1), um engenheiro alemão. Os primeiros motores de automóveis eram bastante primitivos e produziam pouco mais de um cavalo-vapor, desde então, os motores dos automóveis evoluíram significativamente (SHERMAN, 2020).

Figura 1 – Primeiro Automóvel Patentado - Benz Patent Motorwagen



Fonte: Car and Driver (2020)

A partir do final do século XIX até o início do século XX, houve um grande avanço na tecnologia de motores de combustão interna. Os motores tornaram-se mais eficientes, mais leves e mais compactos, permitindo que os carros fossem projetados de maneira mais aerodinâmica e elegante. A exemplo disso, no início do século XX, Henry Ford introduziu a linha de montagem em massa, tornando a produção de carros mais rápida e eficiente. Isso ajudou a popularizar o automóvel e levou a um aumento significativo na demanda por motores de combustão interna. Durante a década de 1920, os motores a gasolina se tornaram mais potentes e confiáveis, permitindo que os carros atingissem velocidades mais altas. Nos anos 30, o sistema de injeção de combustível foi

desenvolvido, aumentando a eficiência dos motores. Após a Segunda Guerra Mundial, a demanda por carros aumentou ainda mais, o que levou a uma pesquisa intensiva em tecnologia de motores de combustão interna. Os motores se tornaram mais potentes, eficientes e confiáveis, o que permitiu o desenvolvimento de carros mais rápidos e seguros (FERREIRA; DIAS, 2021).

Nos anos 60, a indústria automobilística começou a explorar novas tecnologias de motores, incluindo o motor rotativo e o motor de turbina a gás. No entanto, essas tecnologias não foram amplamente adotadas devido a problemas de confiabilidade e eficiência. Nos anos 70, a crise do petróleo levou a um aumento na demanda por carros mais eficientes em termos de combustível. Isso levou ao desenvolvimento de novas tecnologias de motores, incluindo motores de ciclo diesel, motores de ciclo de Miller e motores de ciclo Atkinson (CECCHINI, 2005).

De acordo com Baran (2012) Toyota optou por investir no conceito de veículo híbrido e introduziu o modelo Toyota Prius (Figura 2) em 1997, marcando assim o ponto de partida para a popularização deste tipo de veículo. A adoção em larga escala dos veículos híbridos só ganhou impulso a partir dos anos 2000, quando as vendas alcançaram um total de 598.739 unidades em 2009. Dessas vendas, 44% ocorreram nos Estados Unidos, 41% no Japão, e o restante foi distribuído entre a Holanda, Inglaterra e Canadá. Os carros híbridos de primeira geração usavam principalmente o motor a gasolina, com o motor elétrico sendo usado apenas para ajudar a melhorar a eficiência do combustível e reduzir as emissões. No entanto, nos últimos anos, os carros híbridos evoluíram para incluir motores elétricos mais poderosos, com algumas marcas como Toyota, Honda e Hyundai, oferecendo modelos totalmente híbridos e até mesmo plug-in híbridos (BARAN, 2012).

Os carros híbridos modernos também usam tecnologias avançadas para melhorar a eficiência do combustível, como o sistema de frenagem regenerativa, que converte a energia cinética em eletricidade para carregar a bateria do carro. Alguns modelos usam tecnologia de motor de ciclo Atkinson (Toyota Corolla Cross, Toyota Prius) ou ciclo Miller, que permite que o motor a gasolina funcione de maneira mais eficiente. Além disso, os carros híbridos modernos apresentam mais opções de modo de condução, incluindo modos de condução elétrica pura, que permitem que o carro opere apenas com o motor elétrico, o que é ideal para condução em áreas urbanas com baixa velocidade. Alguns modelos também apresentam a função de auto carregamento, que permite que a bateria do carro seja carregada enquanto o carro está em movimento (PASSOS, 2023).

Figura 2 – Toyota Prius dos anos 2000.



Fonte: ENRIGHT (2008).

A evolução dos carros híbridos tem levado a melhorias significativas em termos de eficiência de combustível e redução de emissões, tornando-os uma opção popular para aqueles que procuram reduzir seu impacto ambiental. Com tecnologias avançadas e recursos inovadores, acredita-se que os carros híbridos continuem a evoluir e se tornem ainda mais eficientes no futuro. À medida que os anos passam, a tecnologia dos motores nos automóveis avança continuamente. Essa evolução contínua permite que novas tecnologias sejam desenvolvidas e implementadas na indústria automotiva. Hoje em dia, muitas montadoras estão experimentando carros totalmente elétricos, movidos a hidrogênio e outras tecnologias avançadas (PRADO, 2019).

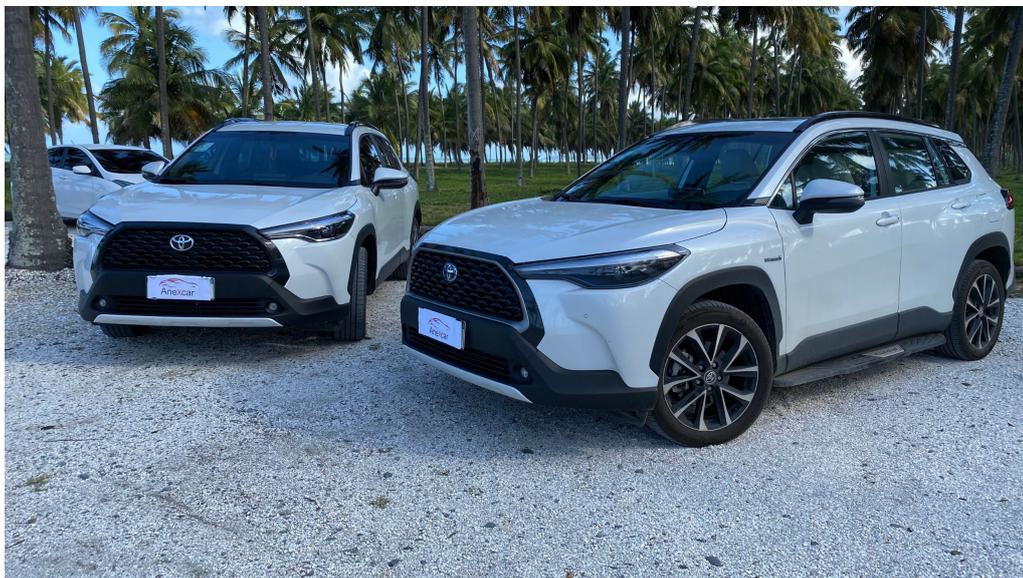
Portanto, fica claro que a transição dos motores a combustão para os motores híbridos e elétricos tem sido uma tendência crescente na indústria, impulsionada por fatores ambientais, econômicos e políticos. Dito isso, é importante a avaliação em termos de eficiência energética e desempenho, em diferentes cenários vivenciados pelos seus usuários, além de custos associados a compra e manutenção, a fim de que os consumidores escolham conscientemente o modelo de acordo com sua realidade.

### 1.1 Objetivos

O objetivo principal deste TCC é fazer uma análise comparativa do carro Corolla Cross nas suas versões XRX 1.8 híbrida e XRE 2.0 flex (Figura 3), por meio de testes de rotação para avaliar o desempenho, avaliação energética e análise financeira para

determinar se a versão híbrida é uma opção viável do ponto de vista econômico.

Figura 3 – Corolla Cross XRE 2.0 flex e nas suas versões XRX 1.8 híbrida.



Fonte: Autor (2022)

### 1.1.1 *Objetivos específicos*

Serão feitos testes comparativos em circuitos pré-definidos de estrada e cidade, a fim de testar o consumo nos trechos. Nos testes será utilizada a ferramenta "SpeedTracker"<sup>1</sup> para fazer gráficos cinemáticos e comparar o desempenho entre o Corolla Cross híbrido e o convencional (sem hibridização). Por fim, será feita uma análise financeira que levará em consideração os custos de manutenção, desvalorização e aquisição, a fim de determinar se vale a pena adquirir um veículo híbrido ou se ainda é melhor optar por um flex convencional.

<sup>1</sup> Aplicativo android disponível em <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.oxagile.speedtrackerfree&hl=pt-br>

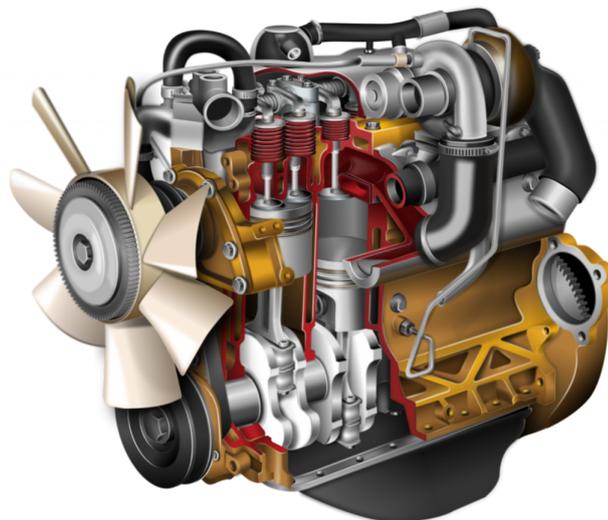
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O funcionamento dos motores de combustão interna é amplamente estudado e compreendido em todo o mundo. Existem quatro tipos principais de ciclos termodinâmicos utilizados em motores de combustão interna: o ciclo Diesel, ciclo Otto, ciclo Atkinson e ciclo Miller. No contexto dos carros híbridos, será abordado os tipos de veículos híbridos, uma vez que é importante este esclarecimento aos consumidores a fim de que possam introduzir da melhor maneira o tipo de automóvel em seu cotidiano.

### 2.1 Tipos de ciclos nos motores a combustão

O ciclo Diesel foi desenvolvido pelo engenheiro alemão Rudolf Diesel no final do século XIX. O motor Diesel (Figura 4) é conhecido por sua alta eficiência térmica e baixo consumo de combustível. O ciclo Diesel é composto por quatro fases: admissão, compressão, combustão e escape. Durante a fase de admissão, o ar é admitido para a câmara de combustão. Na fase de compressão, o ar é comprimido a uma alta pressão e temperatura. Na fase de combustão, o combustível é injetado na câmara de combustão e é queimado, causando uma expansão do gás. Na fase de escape, os gases de escape são expelidos do motor (BRUNETTI, 2018).

Figura 4 – Motor ciclo Diesel.

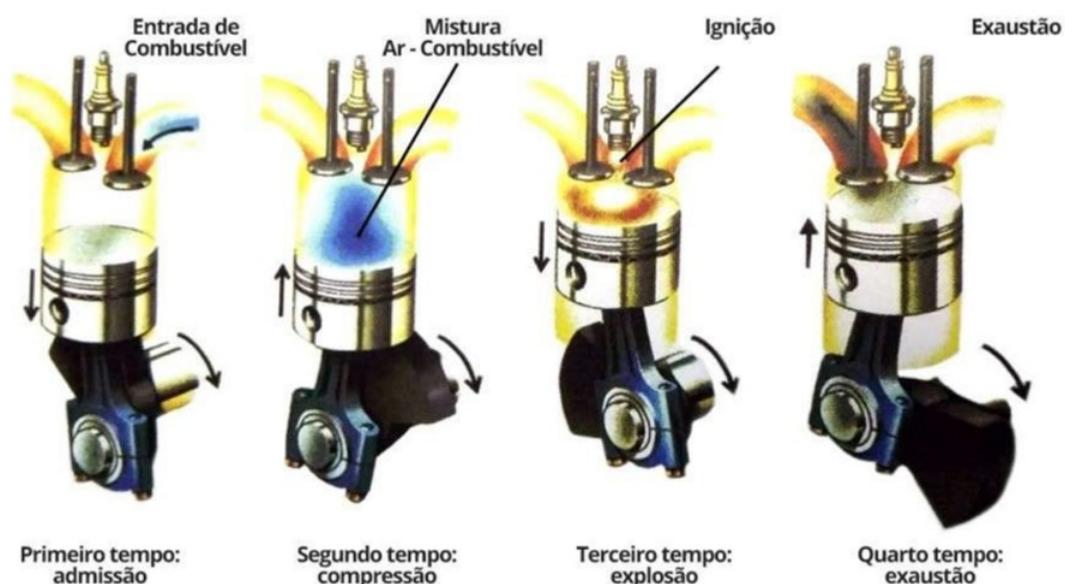


Fonte: Simplo (2022)

O ciclo Otto, nomeado em homenagem ao engenheiro alemão Nikolaus Otto, é o ciclo utilizado em motores a gasolina. O Ciclo Otto é a base de inúmeros motores de combustão interna, alimentando diversos veículos e máquinas. Ele encontra ampla aplicação em automóveis, motocicletas e motores pequenos, como os encontrados em cortadores de grama e geradores. A eficiência e a potência desses motores são

continuamente aprimoradas por meio de avanços tecnológicos e da engenharia. O ciclo Otto é composto por quatro fases: admissão, compressão, combustão e escape (Figura 5). Durante a fase de admissão, a mistura ar/combustível é admitida na câmara de combustão. Na fase de compressão, a mistura é comprimida a uma alta pressão e temperatura. Na fase de combustão, a mistura é inflamada pela vela de ignição, causando uma expansão do gás. Na fase de escape, os gases de escape são expelidos do motor (SILVEIRA, 2008).

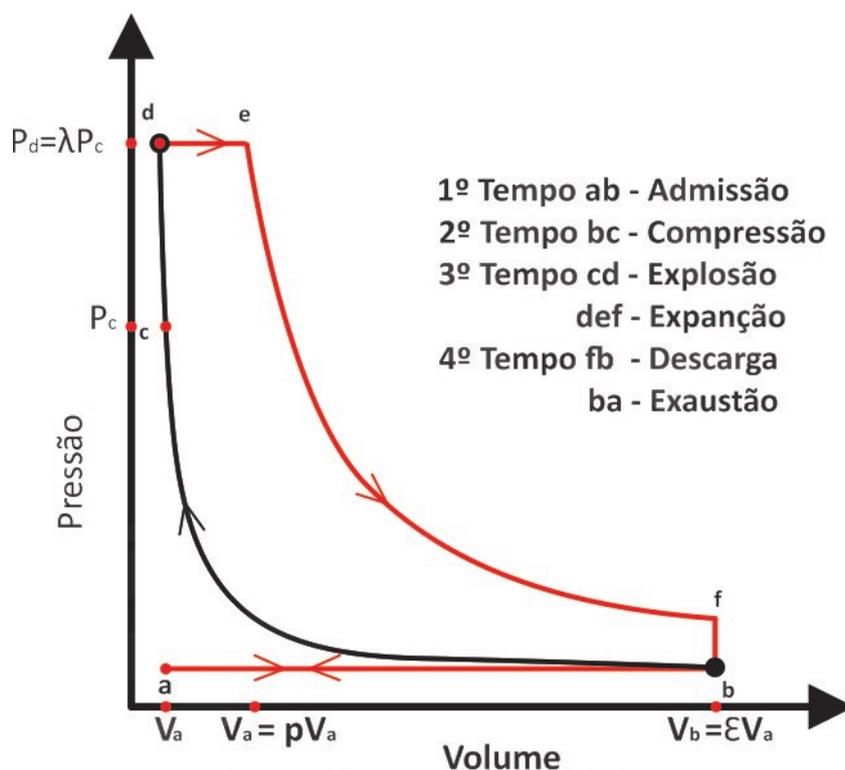
Figura 5 – Ciclo Otto 4 tempos.



Fonte: Simêncio, 2019

O gráfico pressão-volume (PV) do Ciclo Otto (Figura 6) fornece informações valiosas sobre os processos termodinâmicos que ocorrem no motor. A análise do gráfico será abordado a seguir:

Figura 6 – Gráfico Pressão X Volume do Ciclo Otto.



Fonte: Silveira (2008)

- Curso de Admissão: No início, a válvula de admissão abre e a mistura ar-combustível entra no cilindro. Isso resulta em um aumento gradual do volume, enquanto a pressão permanece relativamente constante (BRUNETTI, 2018).
- Curso de Compressão: À medida que o pistão se move para cima, a mistura ar-combustível é comprimida. Isso leva a um rápido aumento da pressão, enquanto o volume diminui significativamente (BRUNETTI, 2018).
- Curso de Potência: No topo do curso de compressão, a vela de ignição acende a mistura comprimida, causando um aumento acentuado da pressão. O volume se expande rapidamente à medida que o pistão se move para baixo, resultando em um aumento significativo na potência (BRUNETTI, 2018).
- Curso de Escape: À medida que o curso de potência termina, a válvula de escape se abre e os gases queimados são expelidos do cilindro. Isso leva a um aumento do volume, enquanto a pressão diminui (BRUNETTI, 2018).

O ciclo Atkinson é um ciclo termodinâmico que foi originalmente desenvolvido pelo engenheiro britânico James Atkinson em 1882. Alguns carros híbridos utilizam o motor

de ciclo Atkinson por causa de sua eficiência aprimorada em comparação com o motor de ciclo Otto tradicional. O motor de ciclo Atkinson é uma variação do motor de ciclo Otto, mas com um projeto otimizado para maximizar a eficiência de combustível. No motor de ciclo Otto convencional, a relação entre a duração da admissão e a duração da compressão é igual. Isso permite que o motor obtenha uma potência maior em relação ao seu tamanho, mas resulta em uma eficiência energética relativamente menor. No entanto, no motor de ciclo Atkinson, a duração da admissão é maior em relação à duração da compressão. Essa diferença no tempo das etapas do ciclo permite uma maior expansão dos gases de combustão durante a fase de potência, aproveitando melhor a energia térmica disponível. Como resultado, o motor de ciclo Atkinson alcança uma maior eficiência térmica, aproveitando ao máximo a energia disponível no combustível (BRUNETTI, 2018).

Nos carros híbridos, o motor de ciclo Atkinson (Figura 7) é frequentemente combinado com um motor elétrico para melhorar ainda mais a eficiência e reduzir as emissões. O motor elétrico pode fornecer energia adicional durante a aceleração e a condução em baixas velocidades, enquanto o motor de ciclo Atkinson é responsável por manter a eficiência durante a condução em velocidades de cruzeiro (DENTON, 2018).

Figura 7 – Motor de Ciclo Atkinson do Corolla Cross híbrido



Fonte: Autor (2022)

O ciclo Miller é um ciclo termodinâmico que foi proposto pelo engenheiro alemão Ralph Miller em 1957. É uma modificação do ciclo Otto que visa melhorar a eficiência do motor reduzindo as perdas por bombeamento. O ciclo Miller é composto por quatro fases: admissão, compressão, expansão e escape. Durante a fase de admissão, a

mistura ar/combustível é admitida na câmara de combustão. Na fase de compressão, a mistura é comprimida a uma alta pressão e temperatura. Na fase de expansão, a válvula de escape é mantida aberta durante parte da fase de combustão, permitindo que os gases queimados saiam do motor antes que o pistão comece a se mover para baixo. Na fase de escape, os gases restantes são expelidos do motor (VONBUN, 2015).

Os carros híbridos são veículos que utilizam dois ou mais tipos de sistemas de propulsão, geralmente um motor a combustão interna e um motor elétrico. Os motores a combustão interna em carros híbridos são geralmente projetados para operar em ciclos Otto ou Atkinson. O motor elétrico é alimentado por baterias que são recarregadas através do uso de um sistema de regeneração de energia durante a frenagem e desaceleração do veículo (DENTON, 2018).

Estudos anteriores investigaram a eficiência de motores híbridos com ciclo Otto e ciclo Atkinson. Os resultados indicaram que os motores com ciclo Atkinson apresentaram uma eficiência energética ligeiramente superior em comparação aos motores com ciclo Otto. Além disso, os autores destacaram que o uso de tecnologias como a recuperação de energia cinética e a redução de perdas por fricção são essenciais para melhorar a eficiência energética em motores híbridos. Em relação ao ciclo Miller, vários autores examinaram seu desempenho e as emissões de um motor híbrido com ciclo Miller. Os resultados mostraram que o uso deste resultou em uma melhoria significativa na eficiência do motor e redução de emissões de poluentes em comparação com um motor convencional com ciclo Otto (VONBUN, 2015).

Concluindo, os ciclos termodinâmicos utilizados em motores de combustão interna, como o ciclo Diesel, ciclo Otto, ciclo Atkinson e ciclo Miller, apresentam diferentes vantagens e desvantagens em termos de eficiência energética e emissões de poluentes. O uso de carros híbridos permite combinar diferentes sistemas de propulsão para melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões de poluentes, sendo essencial o uso de tecnologias complementares, como a regeneração de energia cinética e a redução de perdas por fricção, para maximizar a eficiência energética e reduzir as emissões (VONBUN, 2015).

## 2.2 Tipos de veículos híbridos

### 2.2.1 MHEV: O Híbrido Leve:

Começando com os carros MHEV (Mild Hybrid Electric Vehicle), eles são conhecidos como híbridos leves. Esses veículos possuem um motor de combustão interna tradicional que é auxiliado por um pequeno motor elétrico. O motor elétrico não é capaz

de propulsionar o veículo sozinho, mas atua como um apoio para o motor a gasolina. Ele é alimentado por uma pequena bateria que é carregada por meio da recuperação de energia durante a desaceleração e frenagem do veículo. O MHEV oferece uma melhoria na eficiência de combustível, reduzindo as emissões de poluentes (BRUNETTI, 2018).

Na maioria dos automóveis híbridos leves, não há sequer um motor elétrico independente, mas uma versão mais robusta do alternador e do motor de partida, unidos em uma única peça alimentada por um sistema que geralmente é de 48V (mas pode ser 12V como em carros convencionais). É o sistema *Belt Starter Generator* (BSG), em português traduzido como gerador de partida de correia, consiste em um único motor elétrico é conectado não às rodas, mas ao virabrequim do motor convencional, através de uma correia. Desse modo, é impossível que o carro se mova só pela força da eletricidade. A grande vantagem do sistema está em recursos como o modo *Ve-lejar* do Kia Stonic e outros modelos, nos quais o motor pode ser desligado em um momento de pouca demanda do acelerador (uma descida, por exemplo) e religado imediatamente, favorecendo o consumo. Dependendo da fabricante, também é possível ter algum ganho de torque durante poucos segundos, favorecendo a arrancada do veículo – justamente quando o motor a combustão gasta mais combustível. As baterias desse sistema são bem pequenas, o que contribui bastante para o preço reduzido de acrescentar tal sistema a um veículo. No caso do Stonic, a marca estima cerca de dez por cento mais caro que sua versão convencional; o BSG também será usado nos Fiat Pulse e Fastback a partir de 2024, assim como em modelos futuros da Renault e Volkswagen no país (PASSOS , 2023).

### 2.2.2 HEV: O Híbrido Convencional:

Os carros HEV (Hybrid Electric Vehicle) são os híbridos convencionais que geralmente vêm à mente quando falamos sobre carros híbridos. Eles apresentam um motor de combustão interna e um motor elétrico, mas a diferença é que o motor elétrico dos HEVs é capaz de propulsionar o veículo sozinho por curtas distâncias. A energia elétrica é fornecida por uma bateria maior que é recarregada tanto pelo motor a gasolina quanto pela recuperação de energia durante a frenagem. Os carros HEV são conhecidos por sua melhor economia de combustível e baixas emissões (BRUNETTI, 2018).

O principal representante dessa categoria no Brasil é o Toyota Corolla e sua versão SUV, o Corolla Cross. A principal diferença em relação ao MHEV é a substituição do BSG por um motor elétrico que, de fato, está conectado às rodas, mas não pode ser recarregado na tomada. No caso dos modelos Corolla fabricados no Brasil, o motor

elétrico possui uma potência de 72 cv, o que é maior do que alguns modelos totalmente elétricos, como o Renault Kwid E-Tech. No entanto, os veículos da Toyota não rodam por longos períodos apenas no modo elétrico, uma vez que as baterias, embora maiores do que as dos híbridos leves, também não são de grande capacidade (PASSOS , 2023).

Portanto, um HEV requer sistemas eletrônicos mais avançados, que constantemente ajustam a demanda de cada um dos motores de acordo com a intenção do fabricante e o modo de condução. Além disso, a frenagem regenerativa tende a ser mais intensa e, em alguns modelos, o motor a combustão também pode funcionar como gerador de eletricidade para recarregar as baterias. No caso do Corolla, o motor elétrico atua principalmente em situações de tráfego urbano intenso, quando o consumo de gasolina é mais alto. Em engarrafamentos, o modelo híbrido pode ser aproximadamente 7 vezes mais econômico do que o Corolla 2.0 convencional, além de contar com a vantagem de ter torque instantâneo (PASSOS , 2023).

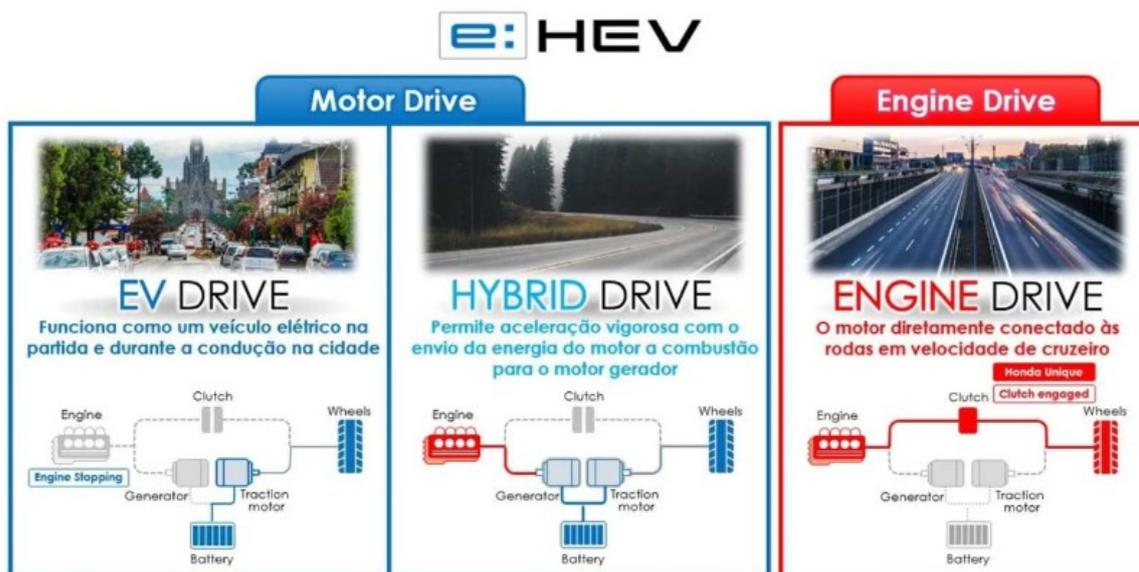
Em junho de 2023, a diferença de preço entre o Corolla Cross XRE 2.0 e o modelo híbrido XRX está em torno de R\$ 37.000,00 , o que demonstra o sucesso da Toyota na economia de escala e na redução de preços dessa tecnologia importada. Por outro lado, esse exemplo mostra que fabricantes com produção nacional podem fazer com que os híbridos leves tenham um acréscimo de valor muito abaixo dos cerca de R\$ 10.000 estimados pela Kia(PASSOS , 2023).

### *2.2.3 Variações de um Híbrido Convencional:*

Existem variações dos carros híbridos convencionais, cada um com suas próprias características distintas. Apesar de o sistema do Corolla ser relativamente simples, as possibilidades mecânicas do carro híbrido são vastas. Um exemplo notável de eletrificação complexa é o da Honda, que oferece o Civic e:HEV no Brasil (Figura 8). Nesses modelos, o motor a combustão nunca carrega diretamente as baterias; em vez disso, ele alimenta um motor-gerador elétrico responsável por essa função. Em condições urbanas, outro motor elétrico impulsiona o veículo, enquanto em situações de maior velocidade, o motor a combustão assume o controle da propulsão (PASSOS , 2023).

Graças a esse esquema, o Honda Civic pode circular por longos períodos no modo elétrico, mesmo sem possuir baterias de grande capacidade. Operando em ciclo Atkinson e evitando fases menos eficientes, o motor a combustão também se mostra muito mais econômico. Nessa complexa "dança", os sistemas eletrônicos do carro calculam, em tempo real, uma função com várias variáveis, que sempre ativa os propulsores mais eficientes de acordo com a situação(Honda , 2023).

Figura 8 – Funcionamento do conjunto de motorização do Honda Civic.



Fonte: Honda do Brasil (2023)

#### 2.2.4 PHEV: O Híbrido Plug-in:

Os carros PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) são uma evolução dos carros híbridos convencionais. Eles possuem uma bateria maior e podem ser recarregados em uma tomada elétrica externa. Isso significa que esses veículos podem percorrer distâncias maiores no modo totalmente elétrico, antes de recorrer ao motor a gasolina. Os PHEVs, assim como os outros tipos citados, são uma ótima opção para aqueles que desejam reduzir o consumo de combustível e as emissões em seus deslocamentos diários (BRUNETTI, 2018).

Recarregar exclusivamente um veículo por meio da frenagem regenerativa é inviável para modelos como o Jeep Compass 4xe, um dos híbridos plug-in mais reconhecidos no mercado brasileiro. Nesse sistema, o motor a combustão e o motor elétrico coexistem, assim como em um híbrido convencional, e por utilizarem baterias maiores, esse sistema necessita de carregadores elétricos externos, o que altera completamente a situação. Embora as baterias do Compass 4xe sejam consideradas de tamanho médio, elas permitem percorrer até 44 km apenas com energia elétrica, proporcionando ao condutor todas as vantagens dinâmicas de um veículo movido a bateria. Aqueles que possuem uma estação de recarga em casa ou no trabalho, por exemplo, conseguem utilizar esse tipo de veículo híbrido por vários dias sem gastar uma única gota de gasolina, recarregando-o em pouco mais de uma hora nos carregadores rápidos, podendo chegar até 20 horas em tomadas convencionais de casa (PASSOS, 2023).

Apesar disso, a grande vantagem dos híbridos plug-in reside na maior interação entre os dois motores, graças às baterias maiores. Isso permite que os computadores do veículo tenham um maior grau de liberdade para obter um bom consumo de combustível do motor a combustão, que acaba sendo melhor apoiado. Outra configuração interessante, inclusive explorada pela Jeep, é a possibilidade de instalar o motor elétrico no eixo traseiro, fornecendo um tipo diferente de tração integral que dispensa o peso e a complexidade do cardã. Embora essa configuração seja possível em híbridos convencionais, ela não é tão vantajosa quanto em um PHEV (PASSOS , 2023).

Devido ao fato de operarem sozinhos por longos períodos, os motores elétricos de veículos desse tipo costumam ser mais potentes e robustos do que os de veículos híbridos convencionais. Esse fator, aliado ao tamanho das baterias e aos componentes de recarga, tornam esses modelos consideravelmente mais caros do que seus equivalentes movidos apenas a combustão (BRUNETTI, 2018).

### 2.2.5 REEV: O Elétrico Sujo

Por fim, temos os carros REEV (Range-Extended Electric Vehicle), também conhecidos como elétricos "sujos", pois, apesar de serem alimentados, principalmente, por motores elétricos, também possuem um pequeno motor a gasolina que atua como gerador para recarregar a bateria quando necessário. O motor a gasolina não é usado para impulsionar o veículo diretamente, mas apenas para estender a autonomia total do carro. Os carros REEV oferecem a vantagem de ter uma maior autonomia elétrica em comparação com outros veículos elétricos (BRUNETTI, 2018).

Um dos primeiros veículos elétricos disponíveis no mercado brasileiro, o BMW i3 também é um dos raros modelos a contar com um extensor de alcance. Essa é uma opção muito específica que, com exceção de alguns modelos chineses, vem sendo cada vez menos utilizada globalmente, embora isso possa mudar no futuro. Além de oferecer a condução com torque instantâneo e sem a necessidade de troca de marchas, os veículos com extensor de alcance não têm seus custos inflacionados pela necessidade de baterias de grande capacidade. Além disso, a autonomia desses carros acaba sendo limitada pela baixa disponibilidade de postos de recarga, assim como acontece com os veículos movidos apenas a combustão (PASSOS , 2023).

A maioria desses modelos também possui pontos de carregamento, o que significa que é possível acionar o motor-gerador a gasolina somente quando necessário. Como esse motor funciona com uma função específica, também é possível otimizar significativamente seu funcionamento, fazendo com que cada litro de gasolina renda mais do que renderia em um carro convencional. À medida que a consciência ambiental aumenta e

a busca por soluções de mobilidade sustentável cresce, os carros híbridos se destacam como uma opção viável. Eles combinam o melhor dos motores de combustão interna e dos motores elétricos, oferecendo maior eficiência de combustível e reduzindo as emissões de poluentes. Com uma variedade de opções disponíveis, desde os híbridos leves até os híbridos plug-in, os consumidores têm a oportunidade de escolher um veículo que atenda às suas necessidades de mobilidade e sustentabilidade (PRADO, 2019)

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No que diz respeito à literatura acadêmica, Vonbun (2015) apresenta os veículos híbridos do tipo plug-in, ressaltando suas vantagens. O autor reconhece o aumento de preço dos PHEVs em relação aos veículos convencionais, em função das baterias e dos mecanismos de controle, além do decorrente acréscimo de peso, que freia o acréscimo de eficiência energética. Em função do aumento de preço, o payback do investimento em um veículo elétrico, em comparação com um convencional, pode demorar alguns anos. Ademais, os ganhos de eficiência da frenagem regenerativa de energia (regenerative braking), que recupera a energia cinética das frenagens, recarregando as baterias.

Adicionalmente, os motores elétricos, ao adicionarem potência aos motores a combustão, permitem que esses sejam menores e mais eficientes em termos energéticos, pois podem fornecer potência adicional quando necessário. Vonbun (2015) ressaltou, ainda, que algumas tecnologias, até então associadas aos híbridos, os tornam mais eficientes que os veículos convencionais, como a direção assistida eletricamente e o ar-condicionado alimentado pelas baterias, além do sistema start stop, que desliga o motor a combustão quando o carro mantém-se parado.

Thiellet (2019) relata sobre os ganhos em termos de economia com os híbridos, mas mencionam a necessidade de elevar a longevidade das baterias. Um dos mais importantes pontos do artigo é a exposição da superioridade dos veículos PHEVs em relação aos veículos a célula de hidrogênio, em especial no que diz respeito à eficiência energética e às dificuldades na distribuição de hidrogênio.

Carvalho *et al.* (2020) didaticamente divide os veículos elétricos em três grandes grupos. A primeira trata de análises acerca da aceitação dos veículos híbridos/elétricos do ponto de vista do consumidor. Esse grupo de artigos pressupõe que a solução de longo prazo para os problemas ambientais e de finitude dos recursos naturais requer veículos elétricos (os híbridos tenderiam a ser um passo intermediário de ligação entre a nova e a velha tecnologia), logo, faz uma análise do ponto de vista do consumidor, ou da viabilidade financeira de se adquirir tais veículos ou se fazerem estimativas da demanda por esses veículos, em função de preços, subsídios e da substitutibilidade dos veículos convencionais pelos elétricos.

O segundo grupo se preocupa fundamentalmente com os custos e os benefícios sociais desses veículos, considerando seus impactos sobre a rede de produção e

distribuição de eletricidade e sua capacidade de alimentar os veículos elétricos e híbridos, o que também pressupõe que se considere a transição tecnológica dos veículos convencionais para os híbridos ou necessária, ou inevitável.

Portanto, pode-se afirmar que o grupo destaca um dos aspectos mais interessantes da adoção da tecnologia de carros elétricos: a possibilidade de gerar fortes externalidades positivas sobre a rede de distribuição de energia, por intermédio do que se convencionou chamar de smart grids. As smart grids podem ajudar decisivamente na viabilização do carro elétrico, o que, por si só, justifica a segmentação aqui proposta. Finalmente, o terceiro grupo de fato busca avaliar se os custos compensam os benefícios de se fazer a transição para híbridos e/ou elétricos. Isto é feito tanto em termos das emissões líquidas quanto da avaliação financeira das externalidades vis-à-vis os benefícios de sua adoção, por meio da redução dessas externalidades e, por vezes, também de seu efeito benéfico sobre a rede de geração e distribuição de energia elétrica (VONBUN, 2015).

Dito isto, é possível concluir quatro pontos sobre as considerações de Vonbun (2015), Thiellet (2019) e Lucena (2018):

1) A tecnologia do setor de geração e distribuição de eletricidade influi decisivamente na avaliação de custos e benefícios dos veículos. Isso inclui quão poluente é a geração marginal de energia. Países ou localidades com as matrizes mais limpas tendem a avaliar de forma mais positiva os veículos elétricos, já países ou localidades com as matrizes mais sujas tendem a avaliá-los de forma menos positiva.

2) Novas tecnologias, notadamente as smart grids, podem mitigar boa parte dos custos de adoção da tecnologia de carros elétricos.

3) Podem ocorrer trade-offs entre emissões de gases de efeito estufa e gases tóxicos nocivos à saúde, especialmente se a tecnologia de geração de energia for suja.

4) Ainda há barreiras tecnológicas a vencer até que o veículo elétrico seja visto como substituto perfeito para os convencionais (incluindo o custo, a durabilidade e a autonomia das baterias), bem como há uma diferença de custo que pode ser substancial. Esses custos nem sempre se justificam do ponto de vista social. Dependendo da metodologia e do escopo geográfico – logo, também da tecnologia de geração e transmissão de eletricidade – dos estudos, nem sempre esses justificam a subvenção estatal a esses veículos. Sem subvenções, enquanto os consumidores não virem esses veículos como substitutos perfeitos – ou melhores – que os veículos convencionais,

haverá dificuldades para a implementação da tecnologia.

### 3.1 Avaliação da demanda

Existe uma linha de pesquisa que se concentra na previsão da demanda futura por veículos elétricos e/ou híbridos. O objetivo desse tipo de investigação é entender que os consumidores só adotarão a nova tecnologia se os benefícios forem evidentes, o que ressalta o desafio técnico de desenvolver tecnologias que proporcionem vantagens financeiras claras aos consumidores (Lucena , 2018).

Foram realizados estudos com o propósito de analisar a estimativa do potencial de demanda dos consumidores italianos por veículos elétricos. Foram considerados elementos como preços, subsídios, custos operacionais e fatores familiares, como distância percorrida, quantidade de veículos no lar e presença de garagem. Essa análise foi baseada em preferências reveladas por meio de questionários e utilizou uma abordagem logit. O estudo concluiu que o fator limitante mais significativo para a adoção de veículos elétricos é o alto custo inicial. As baterias caras também contribuem para um aumento nos custos de manutenção, devido à sua durabilidade limitada (CARVALHO *et al.*, 2020).

De acordo com diferentes cenários de consumo de energia dos PHEVs, as estimativas indicaram que, até 2031, a parcela da frota brasileira composta por veículos híbridos estaria entre 13,6% e 37,4%. O consumo estimado de gasolina nesse período seria de 59% a 86% do que seria no cenário "business as usual", onde os veículos convencionais continuariam dominando o mercado. Em um cenário de aceitação mais ampla desses veículos, até mesmo uma redução no consumo de combustíveis líquidos, incluindo derivados de petróleo e etanol, seria possível. O aumento do consumo de energia elétrica variaria entre 14,0% e 42,1%, dependendo do cenário. O consumo total de energia apresentaria uma diminuição entre 9,2% e 27,5% em relação ao cenário padrão (BARAN, 2012).

As conclusões-chave apontam que o etanol complementar, em vez de competir com a gasolina, e que a disposição dos consumidores brasileiros para adotar novas tecnologias, como visto no sucesso do pró-álcool, facilitaria a disseminação dos veículos híbridos. Para pesquisas futuras, foram sugeridas avaliações econômico-financeiras dos PHEVs após a implementação de redes elétricas inteligentes no Brasil, bem como modelagens do impacto desses veículos nos sistemas de geração e distribuição de energia elétrica (BARAN, 2012).

### 3.2 Análises financeiras

As análises de natureza financeira se concentram na viabilidade, do ponto de vista dos consumidores, de adquirir veículos elétricos ou híbridos, avaliando a economia de combustível e a redução de despesas totais por distância percorrida. Em muitos casos, essas análises levam em conta os incentivos e subsídios governamentais, embora possam ou não incorporar avaliações dos impactos sociais (Lucena , 2018).

Vonbun (2015) demonstrou em seu estudo uma avaliação de custos e benefícios comparando veículos híbridos plug-in, híbridos convencionais (HEVs) e veículos movidos a combustão pura. A avaliação adotou uma perspectiva de custo total de propriedade ao longo da vida útil dos veículos, em dois cenários: curto e longo prazo. Foi examinado o custo de energia e combustível ao longo desses cenários. No curto prazo, as estimativas indicaram que os HEVs se tornariam economicamente vantajosos em relação aos veículos convencionais após uma década de uso.

Os PHEVs nunca alcançariam custos inferiores aos dos veículos convencionais. No cenário de longo prazo, os HEVs se tornariam economicamente vantajosos em comparação com os veículos convencionais após quatro anos de uso, enquanto os PHEVs se tornariam mais vantajosos do que os HEVs após doze anos de utilização. Vonbun (2015) concluiu, portanto, que a equação de custo-benefício dos PHEVs estava fortemente ligada à autonomia dos veículos.

Elementos como custos de combustível, baterias e o comportamento dos motoristas desempenham um papel significativo na disposição dos consumidores em investir em PHEVs. Dada a diversidade das características dos PHEVs disponíveis na época, prever o potencial de vendas desses veículos era complexo. No entanto, o potencial para redução do consumo de petróleo por veículo era substancial, chegando a 45%, superando os 30% dos HEVs. Aumentos na autonomia dos PHEVs, no entanto, levariam a aumentos consideráveis nos custos, e a incerteza sobre esses custos dificultaria a avaliação de sua viabilidade econômica (CARVALHO *et al.*, 2020).

Foi observado, ainda, que existem barreiras que obstaculizam a adoção generalizada dos PHEVs. Enquanto reconheceram barreiras técnicas, como o alto custo das baterias e a limitada autonomia, é possível destacar as barreiras socioculturais, que diz respeito à tendência dos consumidores de não calcular o valor presente líquido das economias de combustível ao longo da vida útil do veículo ao considerar a compra de um PHEV (CARVALHO *et al.*, 2020).

Outra barreira é o preço inicial mais alto dos PHEVs. Fatores sociológicos também desempenham um papel, como a associação de veículos médios ou pequenos a carros econômicos, o que pode levar a uma percepção social negativa. Os carros são frequentemente símbolos de status, mas veículos econômicos podem ter o efeito oposto. Ademais, a incerteza em relação à necessidade de substituição das baterias poderia inviabilizar o sucesso dos carros elétricos, uma vez que as baterias representam uma parcela significativa do custo total e possuem durabilidade abaixo das expectativas para veículos convencionais (CARVALHO *et al.*, 2020).

Managi (2012) investigou a viabilidade econômica da disseminação de veículos totalmente elétricos e veículos de célula de combustível (hidrogênio) no mercado, por meio de uma análise de custo-benefício voltada para o setor privado. O estudo considerou progressos tecnológicos, economias de escala e a disponibilidade de produção de energia elétrica a partir de fontes não poluentes ou renováveis. Os resultados sugerem que os veículos de célula de combustível só se tornariam economicamente viáveis por volta de 2110, mesmo que seus custos se equiparassem aos dos veículos de combustão interna. Já os veículos puramente elétricos poderiam alcançar viabilidade por volta de 2060, dependendo do aumento dos preços da gasolina e dos subsídios para a redução de CO<sub>2</sub>. Além dos custos, problemas como a baixa autonomia e outras questões de adaptação ao estilo de vida dos proprietários também influenciam a viabilidade desses veículos (MANAGI, 2012).

Em resumo, as análises centradas na viabilidade financeira não apresentam perspectivas otimistas, destacando não apenas os custos elevados e os períodos longos de retorno do investimento, mas também sublinhando as barreiras comerciais relacionadas à limitada autonomia das baterias, problemas de infraestrutura de recarga e outros fatores, particularmente a relação entre os preços dos combustíveis e os custos da energia. Surge a sugestão da necessidade de subsídios para esse tipo de veículo, o que só pode ser considerado viável após uma avaliação completa dos impactos sociais.

### 3.3 Análises sociais

Certas estratégias de políticas públicas foram propostas por vários estudos, incluindo por Wolffenbüttel (2022). Essas estratégias incluem o aumento das regulamentações sobre as emissões de CO<sub>2</sub>, aprimoramento da medição do consumo de eletricidade dos veículos elétricos (EVs), expansão da capacidade energética após 2030, aumento na tributação de fontes de energia poluentes, garantia de disponibilidade de pontos de recarga locais e a adoção de padrões uniformes para interfaces de recarga.

Ademais, as emissões provenientes de veículos automotores estavam associadas a uma variedade de problemas de saúde, especialmente doenças respiratórias, sem mencionar os gases de efeito estufa que podem causar impactos ambientais graves. Uma solução em potencial para esse problema seria a adoção de veículos elétricos, os quais emitem pouca ou nenhuma poluição diretamente. Se uma parcela significativa da eletricidade fosse proveniente de fontes limpas, a contribuição dos veículos para a emissão seria insignificante (VONBUN, 2015).

As conclusões extraídas da literatura sugerem que, embora os carros elétricos superem os veículos movidos a hidrogênio em termos de viabilidade econômica e eficiência energética, ainda enfrentam desafios significativos que limitam a substituição dos veículos convencionais movidos a combustão no curto e médio prazo. Uma alternativa crescente é representada pelos veículos híbridos, especialmente os modelos híbridos plug-in. Esses veículos podem obter energia tanto da gasolina quanto da rede elétrica. Apesar de serem mais caros e pesados em comparação com os híbridos convencionais e os veículos a combustão, os híbridos plug-in podem combinar diversas vantagens de ambas as tecnologias – emissões reduzidas dos veículos elétricos com a ampla autonomia e facilidade de abastecimento dos veículos a combustão (VAZ *et al.*, 2015).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Seleção dos Carros e Versões

A escolha dos modelos XRX 1.8 híbrida 2022 e XRE 2.0 flex 2022 foi feita devido ao fato de o Corolla Cross oferecer, em um único modelo, versões híbridas e não híbridas. Além disso, o fato de possuir um coeficiente aerodinâmico igual entre as versões traz maior confiabilidade a nossa análise pois ao manter o coeficiente aerodinâmico constante, você elimina uma variável que poderia distorcer os resultados.

### 4.2 Circuitos de Teste

O percurso de estrada selecionado para o teste foi estabelecido entre um posto situado nas proximidades da cidade de Moreno, em Pernambuco, e a entrada da cidade de Vitória de Santo Antão, também em Pernambuco, ao longo da estrada BR-232. A extensão total desse trecho é de aproximadamente 25 km (Figura 9). Foram realizados 2 testes com a versão convencional e 1 com o híbrido por uma questão de limite financeiro do autor.

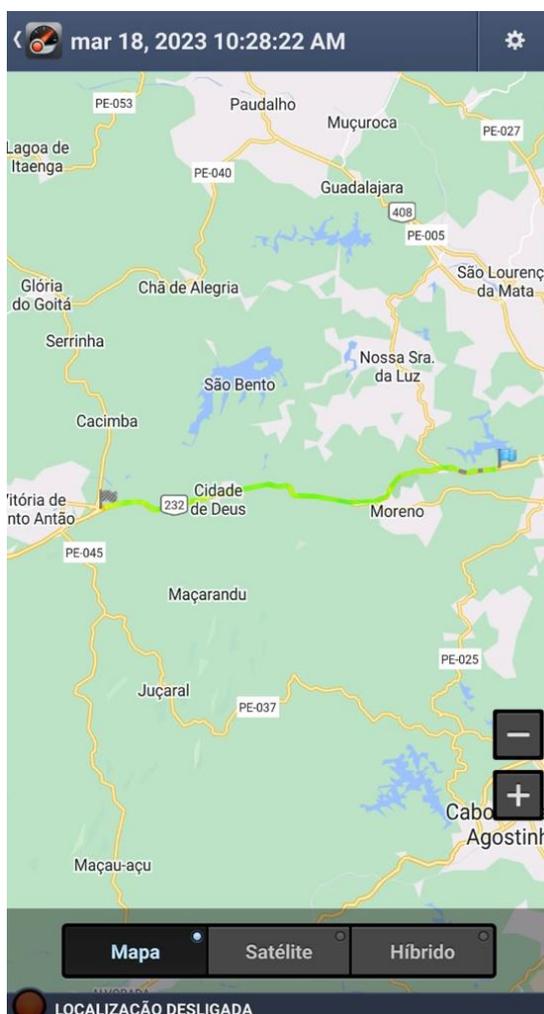
Para garantir a uniformidade dos resultados, optou-se por uma padronização no circuito de teste. Inicialmente, foi realizada uma aceleração do veículo de 0 a 100 km/h no início do teste, seguida por uma retomada de aproximadamente 50 km/h até 120 km/h em pontos estrategicamente selecionados ao longo do percurso. Simulando assim uma ultrapassagem. No início dos testes o Trip do computador de bordo foi zerado, logo após o 0 a 100 km/h o computador de bordo foi zerado. Ao término do teste, foi tirada foto do painel, deixando registrado consumo e a distância percorrida.

O teste na cidade foi conduzido ao longo da Rua Dr. José Maria, em Recife, Pernambuco, abrangendo o trecho que se estende até a Universidade Federal de Pernambuco (Figura 10). Durante esse experimento, foram realizados testes em diferentes condições, incluindo cenários sem engarrafamento, como é possível encontrar durante o final de semana, e horários de tráfego intenso, avaliando o desempenho e eficiência de ambos os veículos em situações variadas. A distância total desse trecho é de 9,3 km. O computador de bordo foi novamente zerado no início do teste e foram registrados os dados ao término. Cada versão realizou um teste com tráfego e um sem trânsito.

Essa metodologia permite uma análise mais precisa e comparativa dos resultados obtidos, dentro do possível, uma vez que todos os testes são realizados sob as mesmas condições. Abaixo, encontra-se o registro detalhado do circuito exato utilizado durante

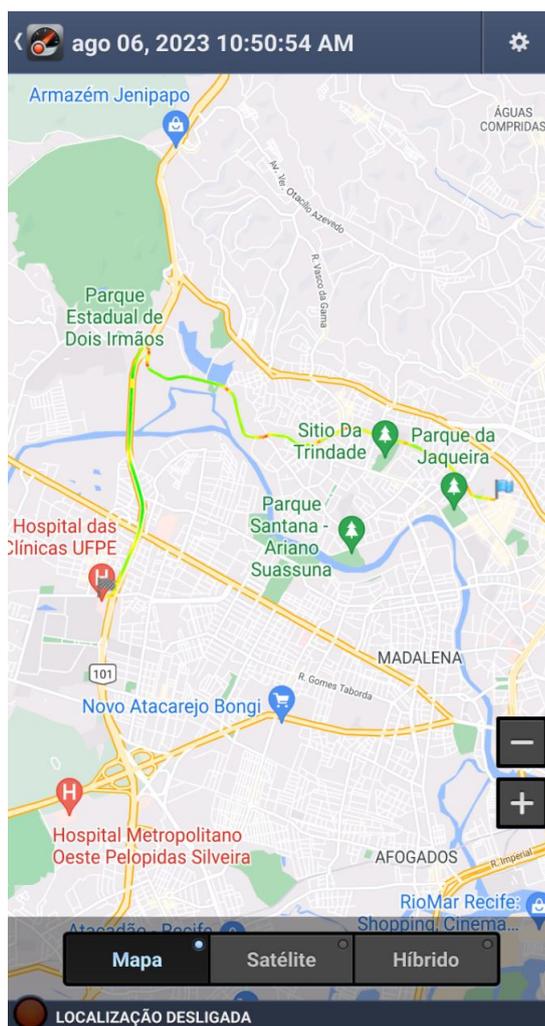
o teste.

Figura 9 – Percurso estrada.



Fonte: Autor (2023)

Figura 10 – Percurso cidade.



Fonte: Autor (2023)

### 4.3 Coleta de dados

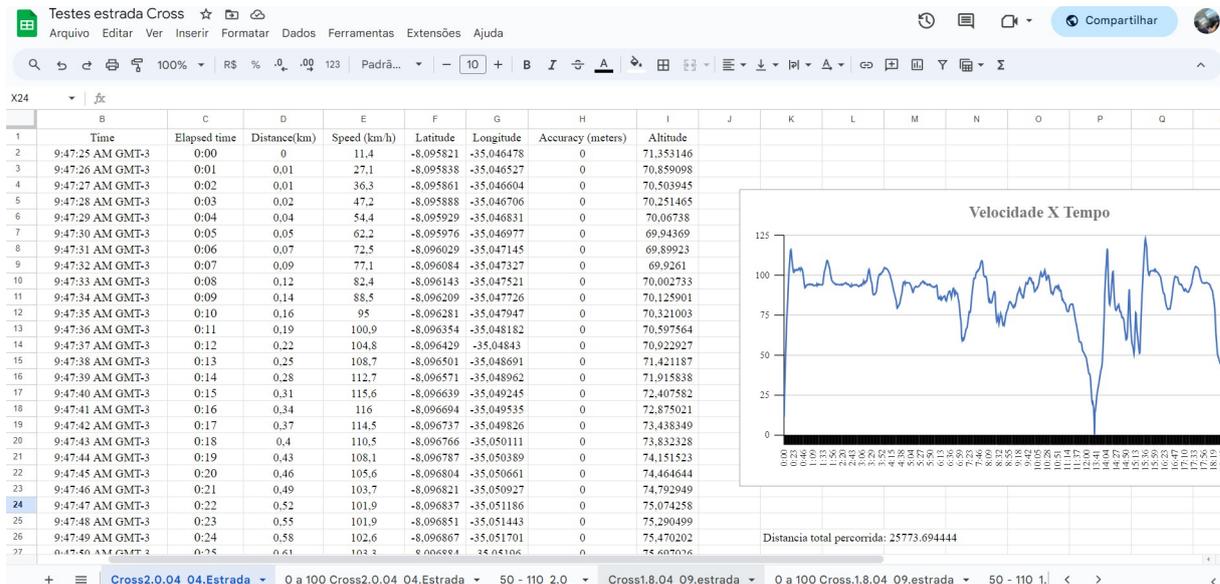
#### 4.3.1 Ferramenta SpeedTracker

O Speed Tracker é um aplicativo de velocímetro e computador de bordo baseado em GPS para rastrear a velocidade e distância percorrida por um veículo, a exemplo do carro, bicicleta ou motocicleta. Ele foi projetado para funcionar com qualquer dispositivo habilitado para GPS, incluindo Android e iOS.

#### 4.3.2 Forma de colhimentos dos dados

O aplicativo Speed Tracker rastreia o percurso e gera um arquivo no formato CSV, o qual contém dados como tempo, velocidade, latitude, longitude, entre outros. Esses dados são expostos no excel conforme a Figura 11 a seguir.

Figura 11 – Dados expostos no excel



Fonte: Autor (2023)

Ademais, o consumo foi medido através do computador de bordo do veículo. Antes do teste, o consumo foi zerado e medido apenas para o trecho em questão. É importante destacar que segundo o Feldman (2019), o teste no computador de bordo geralmente apresenta uma estimativa um pouco mais otimista do consumo real. No entanto, considerando que foi realizado de maneira igual em ambos os veículos, esse método torna-se adequado para fins de comparação.

#### 4.4 Análise de Resultados

Após a coleta dos dados, os resultados expostos em uma planilha de excel foram submetidos a análise cinemática adotada por Andrade (2020), que por sua vez utiliza o MATLAB, plataforma de software que oferece uma linguagem de programação, funções matemáticas, visualização de dados e simulação de sistemas. Com os dados, foi possível formular gráficos e tabelas para facilitar a compreensão das diferenças entre as versões do veículo.

Para obter os dados de velocidade-tempo de um veículo (*Floating car data*), primeiro foi necessário definir o trajeto desejado, levando em consideração a sua representatividade em relação ao tráfego no local onde se planeja construir um ciclo de condução. Além disso, a seleção dos veículos, dos equipamentos de análise e dos horários de teste desempenhou um papel importante na criação do floating (ANDRADE, 2020).

Após a coleta de informações através do aplicativo Speed Tracker, os dados gerados foram processados para eliminar possíveis erros de leitura. Isso foi feito usando um filtro que identifica leituras inconsistentes e as substitui por pontos interpolados entre as leituras anteriores e posteriores à posição inconsistente.

Tabela 1 – Parâmetros de caracterização dos ciclos desenvolvidos

Caracterização do floating	
Vel. média com base no tempo andando – V (km.h <sup>-1</sup> )	$v = 3,6 \frac{\text{dist}}{t_{\text{cond}}}$
Vel. média com base no tempo total - V <sub>c</sub> (km.h <sup>-1</sup> )	$v_c = 3,6 \frac{\text{dist}}{t_{\text{total}}}$
Aceleração média – a (m.s <sup>-2</sup> )	$a = \left( \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & (a_i > 0,1) \\ 0 & \text{se não} \end{cases} \right)^{-1} \sum_{i=1}^n \begin{cases} a_i & (a_i > 0,1) \\ 0 & \text{se não} \end{cases}$
Desaceleração Média – d (m.s <sup>-2</sup> )	$d = \left( \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & (a_i < -0,1) \\ 0 & \text{se não} \end{cases} \right)^{-1} \sum_{i=1}^n \begin{cases} a_i & (a_i < -0,1) \\ 0 & \text{se não} \end{cases}$
Percentual do tempo parado - T <sub>p</sub>	$T_p = (t_{\text{Total}})^{-1} \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & (v = 0 \text{ e } a_i < 0,1) \\ 0 & \text{se não} \end{cases}$
Percentual do tempo com velocidade cte - T <sub>c</sub>	$T_c = (t_{\text{Total}})^{-1} \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & (v > 0 \text{ e } -0,1 < a_i < 0,1) \\ 0 & \text{se não} \end{cases}$
Percentual do tempo acelerando - T <sub>a</sub>	$T_a = (t_{\text{Total}})^{-1} \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & (a_i > 0,1) \\ 0 & \text{se não} \end{cases}$
Percentual do tempo desacelerando - T <sub>d</sub>	$T_d = (t_{\text{Total}})^{-1} \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & (a_i < -0,1) \\ 0 & \text{se não} \end{cases}$
Desvio padrão da velocidade – σ <sub>v</sub> (km.h <sup>-1</sup> )	$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2}$

Fonte: Barlow et al. (2009)

Com base nos vetores de velocidade gerados pelo Speed Tracker, foi utilizado o programa desenvolvido por Andrade (2020) para analisar os parâmetros de caracterização do vetor de velocidade, utilizando as fórmulas indicadas na Tabela 1. Após a obtenção desses dados, eles serão submetidos a uma análise e interpretação, a fim de avaliar o comportamento dos veículos em diferentes cenários, incluindo estradas, ambientes urbanos com tráfego e ambientes urbanos sem trânsito.

#### 4.5 Análise de Consumo

Para o teste de consumo, utilizamos o computador de bordo de ambos os carros. Geralmente, o computador de bordo tende a mostrar um consumo um pouco mais otimista do que o consumo real medido na bomba de combustível. No entanto, uma vez que estamos lidando com veículos da mesma marca e do mesmo ano, consideramos que a variação na margem de erro é igual para ambos os carros. Isso proporciona uma análise com maior confiabilidade, uma vez que o objetivo é fazer uma comparação.

Os testes de consumo na estrada foram realizados do bairro Curado, em Recife, até a entrada da cidade de Vitória De Santo Antão, ambas localizadas no estado de Pernambuco, conforme a Figura 9. O consumo foi zerado no início do teste, e foi registrado ao término do percurso por meio de fotografias. Nesse contexto, foram efetuados dois testes de consumo referentes ao automóvel convencional (XRE) e um ao híbrido (XRX).

Quanto ao teste de consumo na cidade, foi realizado em Recife, partindo do bairro do Rosarinho até a Universidade Federal de Pernambuco, conforme a Figura 10, em duas diferentes situações de tráfego. Um dos testes ocorreu durante um dia de semana, no horário de pico (8 da manhã), enquanto o outro foi conduzido durante o final de semana, quando é possível encontrar um fluxo menor de veículos. O consumo foi zerado no início do teste e registrado por meio de fotografia ao término do percurso.

#### 4.6 Análise de Custos

Para efeito de comparação, foi realizado uma análise abrangente dos principais custos associados a ambos os veículos.

Os custos de manutenção regular foram acompanhados em ambos os carros ao longo de 28 meses, cobrindo todas as revisões programadas (a cada 10 mil km). Essas revisões incluíram tarefas como troca de óleo, substituição de filtros, alinhamento de pneus, balanceamento de pneus e lubrificação de componentes. Foi considerado apenas o valor final pago em cada revisão para determinar qual veículo é mais caro de manter.

No que diz respeito à depreciação, foi excluído o impacto da inflação, e comparado o valor pago na aquisição do veículo com o valor da Tabela FIPE em setembro de 2023. Estamos cientes de que um veículo usado raramente é vendido pelo valor total da Tabela FIPE, mas o objetivo desta análise é entender a desvalorização comparativa dentro do cenário atual no nosso país.

Quanto aos custos de combustível, foi considerado um total de 50 mil quilômetros percorridos em 28 meses, o que equivale a uma média de 1786 quilômetros por mês. Utilizamos os resultados dos testes de consumo realizados na cidade (em condições de tráfego) e na estrada para calcular a quantidade mensal de litros de combustível e, em seguida, multiplicamos pelo preço do litro em setembro de 2023. Realizamos análises para diferentes cenários: uma distribuição equilibrada, na qual metade da quilometragem é percorrida na cidade e a outra metade na estrada; uma utilização mais voltada para a cidade, na qual 70% da quilometragem é realizada em áreas urbanas e 30% em estradas; e, por fim, uma priorização de uso em estradas, na qual 30% da quilometragem é percorrida em áreas urbanas e 70% em rodovias.

As despesas com seguro e IPVA foram baseadas nos valores pagos no ano de 2023. Vale ressaltar que o seguro do Cross XRX 2.0 foi cotado para um homem casado de 55 anos, enquanto o seguro do Cross XRX híbrido foi cotado para um idoso de 75 anos. Ambos residem na mesma cidade.

Finalmente, realizamos um cálculo de Payback (indicador de tempo de retorno do investimento) para determinar em quantos anos de economia financeira com combustível o investimento na aquisição do veículo híbrido compensaria em comparação com a versão tradicional.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Testes cinemáticos

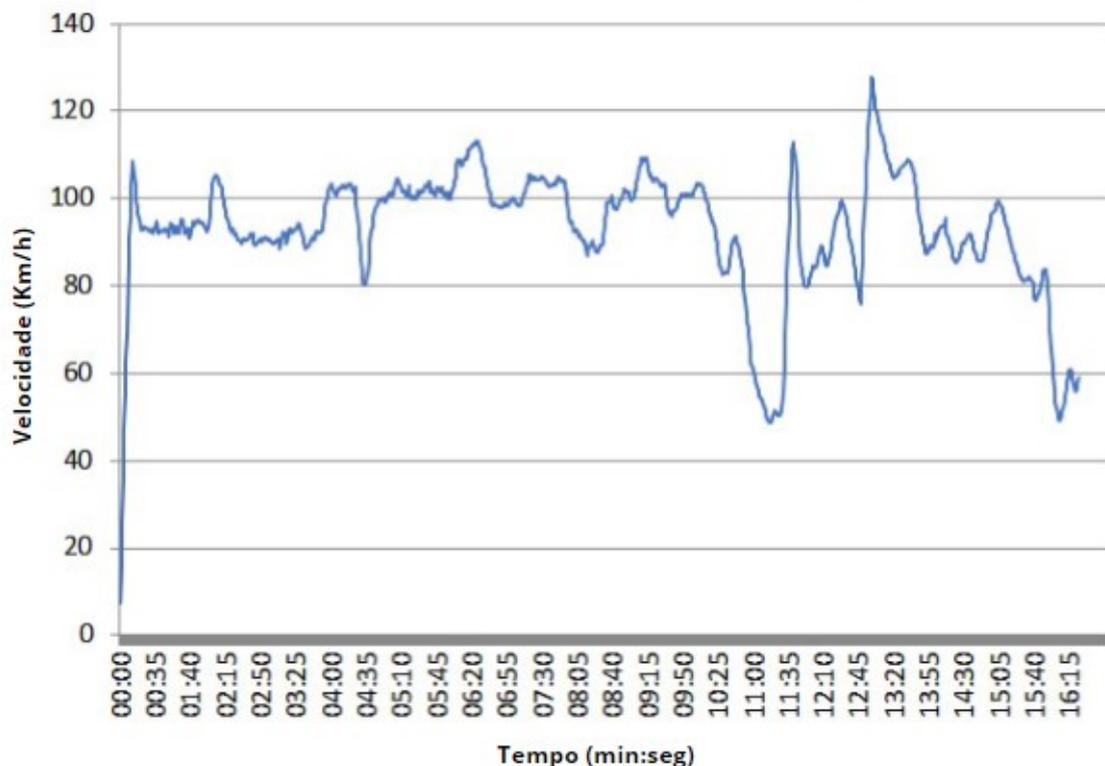
Conforme descrito na metodologia deste estudo, os testes cinemáticos na estrada foram realizados do bairro Curado, em Recife, até a entrada da cidade de Vitória De Santo Antão, ambas localizadas no estado de Pernambuco. Dessa forma, foram efetuados dois testes referentes ao automóvel convencional (XRE) e um ao híbrido (XRX).

Foi realizada uma aceleração do veículo de 0 a 100 km/h no início do teste, seguida por uma retomada de aproximadamente 50 km/h até 110 km/h em pontos estrategicamente selecionados ao longo do percurso. Simulando, assim, o desempenho do veículo em uma ultrapassagem.

#### 5.1.1 Percurso estrada

O teste de estrada 1, no que tange ao primeiro teste do automóvel XRE, foi realizado no dia 18/03/2023, cujo resultado está demonstrado na figura abaixo (Figura 12).

Figura 12 – Teste 1 estrada Cross 2.0 XRE

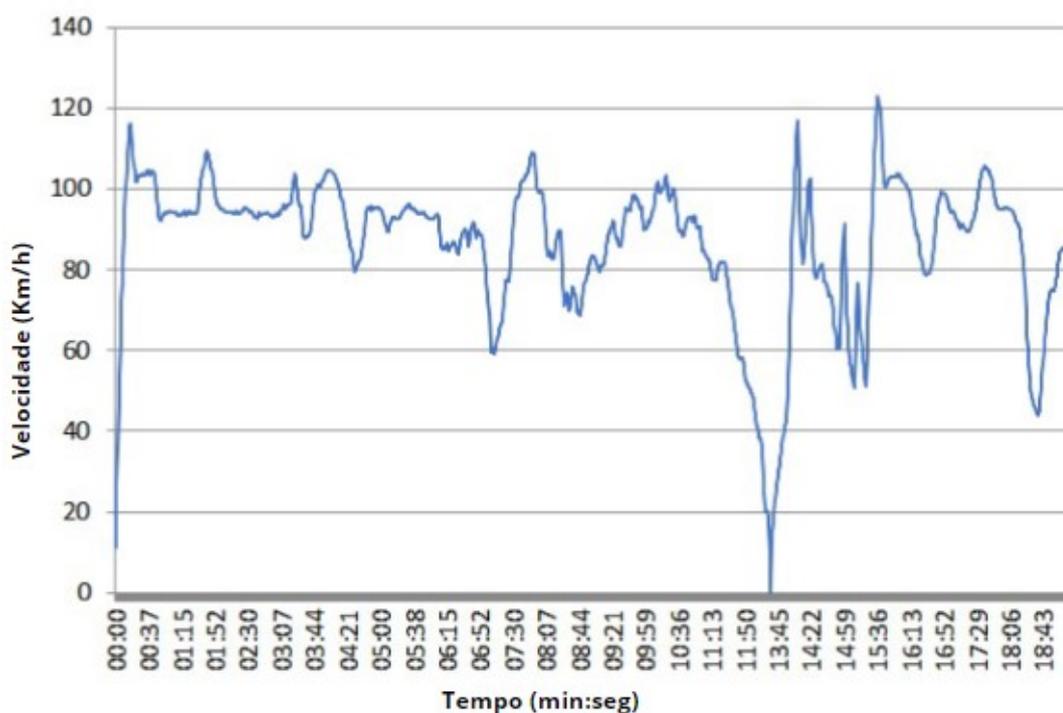


Fonte: Autor (2023)

No teste de aceleração de 0 a 100 km/h com o ar condicionado desligado. Inicialmente, o veículo estava com o pé no freio, e em seguida, o motorista acelerou intensamente, soltando o freio logo em seguida. Essa sequência proporcionou o melhor resultado de aceleração. Vale ressaltar que o câmbio permaneceu na posição D (Drive) durante todo o teste. O veículo demorou 10,59 s no 0 a 100 km/h.

No segundo teste do XRE, que ocorreu no mesmo percurso em 04/04/2023, obtivemos o gráfico de Velocidade x Tempo, conforme ilustrado na Figura 13 abaixo. No início do teste, realizou-se uma aceleração de 0 a 100 km/h, seguida por mais duas retomadas de velocidade durante a avaliação.

Figura 13 – Teste 2 estrada Cross 2.0 XRE

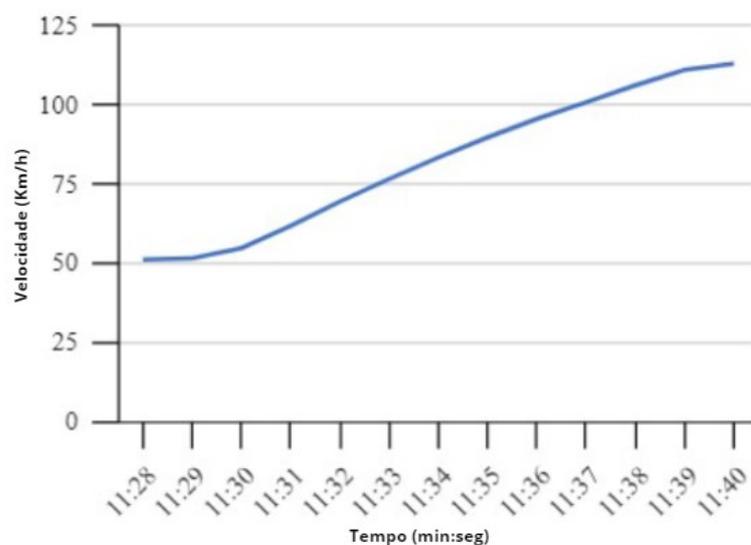


Fonte: Autor (2023)

No primeiro trecho do gráfico acima, no qual também foi realizado um teste de aceleração de 0 a 100 km/h com o ar condicionado desligado, veículo parado, e em seguida, o motorista acelerou intensamente, soltando o freio logo em seguida, o veículo obteve o 0 a 100 km/h em 10,85s, bem próximo do resultado do primeiro teste (10,59s).

Dentro do teste 2 com o Cross XRE, no minuto 11 do gráfico representado na figura 16, conduzimos um teste de retomada, indo de 50 a 110 km/h com o ar condicionado ligado. O veículo conseguiu completar essa aceleração em cerca de 10 segundos. Os resultados desse teste estão apresentados na Figura 14 abaixo:

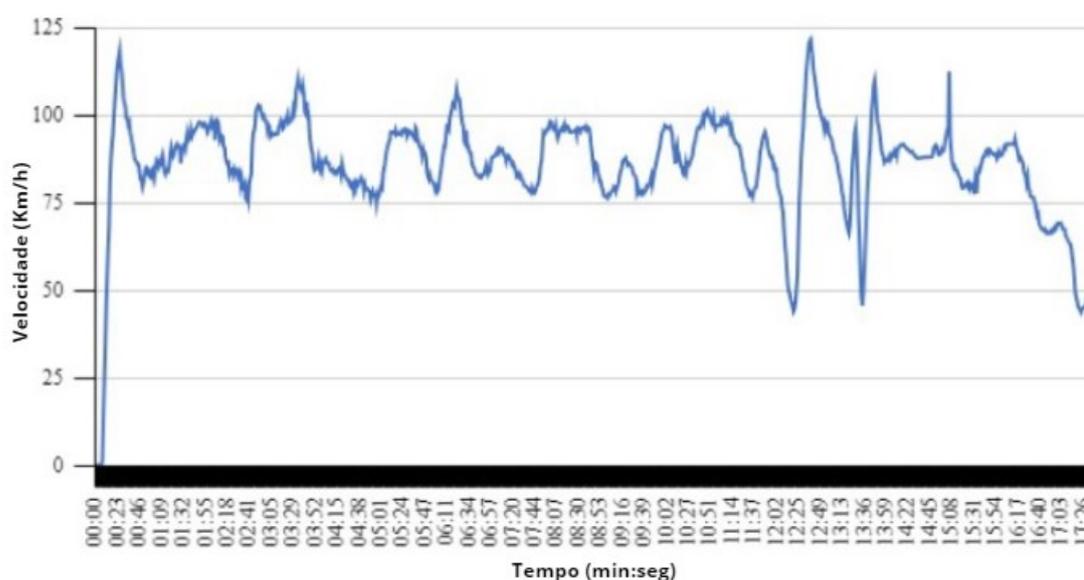
Figura 14 – 50 a 110 Km/h do teste 2 no Cross 2.0 XRE



Fonte: Autor (2023)

Por último, realizamos o primeiro teste com o Corolla Cross Híbrido, conforme ilustrado na Figura 15. O teste foi conduzido no mesmo percurso, com duas pessoas a bordo e pelo mesmo motorista que realizou os testes anteriores (o autor). É importante destacar que, devido a restrições financeiras, fizemos apenas um teste com o veículo híbrido. No entanto, é válido mencionar que todos os testes na estrada foram realizados em condições de tráfego leve, o que aumenta a confiabilidade dos resultados obtidos.

Figura 15 – Teste 1 estrada no Cross 1.8 XRX Híbrido

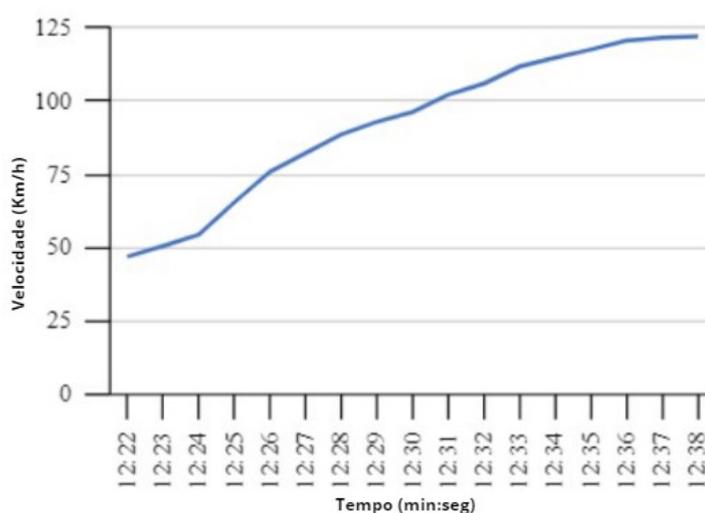


Fonte: Autor (2023)

Na versão híbrida do Cross, foi observado um resultado inferior de desempenho no teste, o carro alcançou o 0 a 100km/h em 13,02 s. Apesar da versão híbrida possuir motor a combustão combinado com motores elétricos, estima-se que o modelo tenha apenas 122 cv de potência combinada, contra 177 cv da versão do Corolla Cross sem eletrificação segundo o manual do veículo Toyota (2022).

Dentro do teste 1 com o Cross XRX na estrada, no minuto 12 do gráfico representado na figura 15, foi conduzido um teste de retomada, indo de 50 a 110 km/h com o ar condicionado ligado. O veículo conseguiu completar essa aceleração em cerca de 13 segundos, resultado novamente pior que a versão não híbrida. Os resultados desse teste estão apresentados na Figura 16 abaixo.

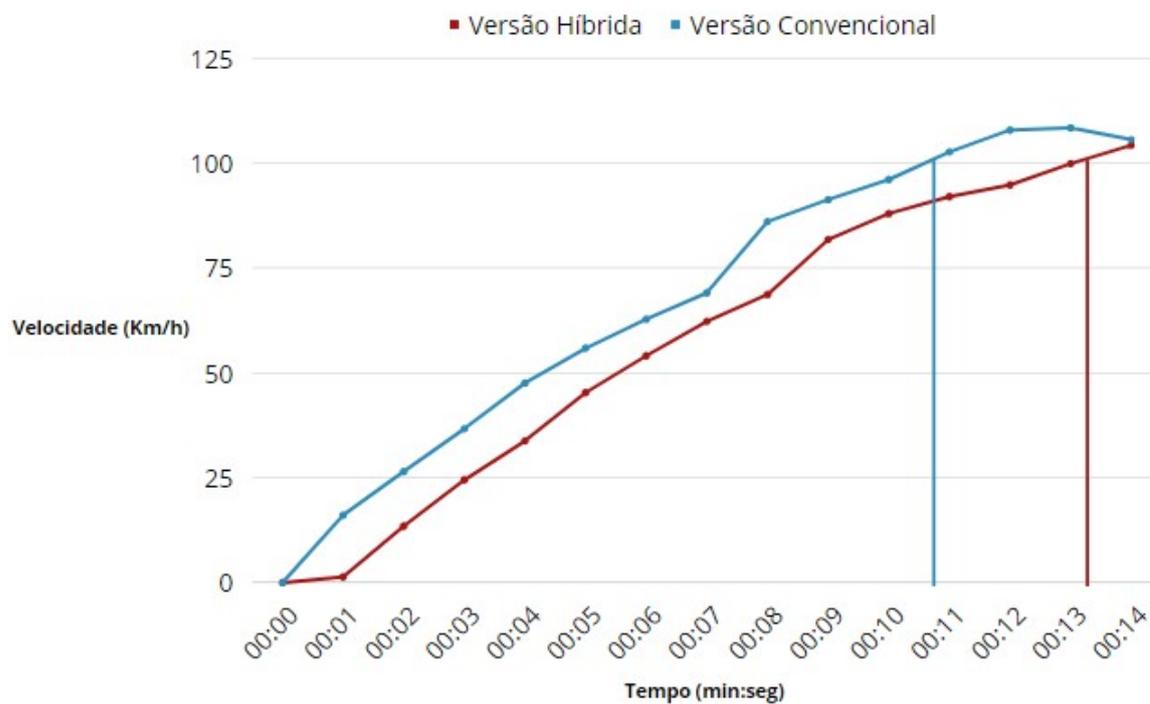
Figura 16 – 50 a 120 Km/h do teste 1 no Cross 1.8 XRX Híbrido



Fonte: Autor (2023)

Abaixo, na figura 17, segue o comparativo do 0 a 100 Km/h do teste 1 do Corolla Cross XRE com o teste 1 do Corolla Híbrido XRX.

Figura 17 – Comparativo do 0 a 100 Km/h



Fonte: Autor (2023)

Ao utilizar o método cinemático sugerido por Andrade (2020), conseguimos adquirir dados de relevância que nos permitem chegar a algumas conclusões. Na tabela 2, são exibidos os resultados do primeiro teste realizado na estrada com o modelo 2.0 convencional e o primeiro teste com a versão Híbrida. Ambos os testes ocorreram em condições de tráfego leve, com o mesmo motorista (o autor) ao volante.

Tabela 2 – Dados da simulação no circuito estrada

	Cross 2.0 XRE	Cross 1.8 XRX Híbrido
Distancia total percorrida (m)	24641,75	25061,22
Tempo em velocidade cte (s)	281	236
Tempo andando (s)	955	1044
Porcentagem do tempo andando	100 %	99,71%
Porcentagem do tempo com velocidade cte	29,42 %	22,54 %
Porcentagem do tempo acelerando	32,14 %	36,48 %
Porcentagem do tempo desacelerando	38,42 %	40,68 %
Porcentagem do tempo parado	0 %	0,28%
Velocidade media com base no tempo total (km/h)	92,89	86,17
Veloc média com base no tempo andando (km/h)	92,89	86,41
Veloc maxima do percurso (km/h)	128,00	122
Desvio padrão velocidade	26,11	24,29
Acel média positiva (m/s <sup>2</sup> )	0,43	0,52
Desvio padrão aceleração	0,47	0,61
Numero de paradas	0	2
Distancia média entre paradas (m)	-	0,06
Paradas por km	0	0,07

Fonte: Autor (2023)

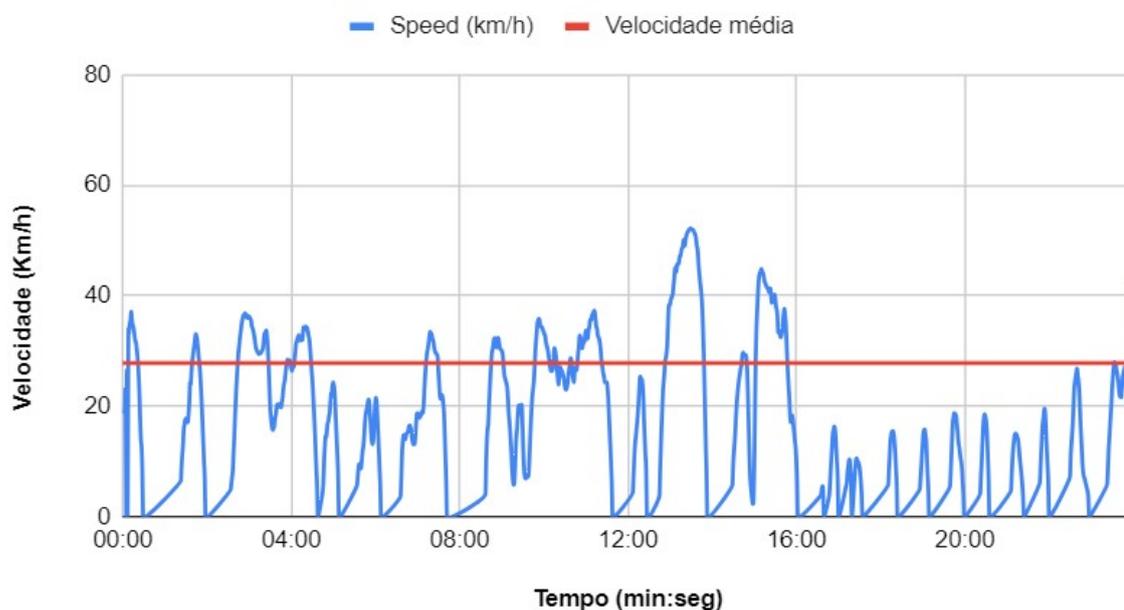
Através da análise da porcentagem do tempo em que a velocidade permanece constante, é possível notar que o veículo híbrido enfrenta maior dificuldade em manter uma velocidade de cruzeiro estável. Mesmo pequenas subidas tendem a fazer com que o veículo perca velocidade com facilidade devido ao seu motor menos potente. Além disso, notamos que a velocidade média de cruzeiro para a versão XRE foi de 92,89 km/h, enquanto a versão híbrida XRX registrou uma média de 86,17 km/h, o que reforça a observação anterior. Ademais, é importante destacar que a versão 2.0 XRE conseguiu atingir uma velocidade máxima superior à do modelo híbrido, considerando que ambos iniciaram e terminaram sua retomada de velocidade num mesmo ponto.

### 5.1.2 Percurso cidade

O teste urbano foi conduzido a partir do bairro do Rosarinho, localizado em Recife, Pernambuco, até a Universidade Federal de Pernambuco. Realizamos esse percurso em duas situações de tráfego distintas: uma durante a semana, durante o horário de maior congestionamento (teste 1), e outra durante o final de semana, quando é possível encontrar um menor volume de veículos nas vias (teste 2).

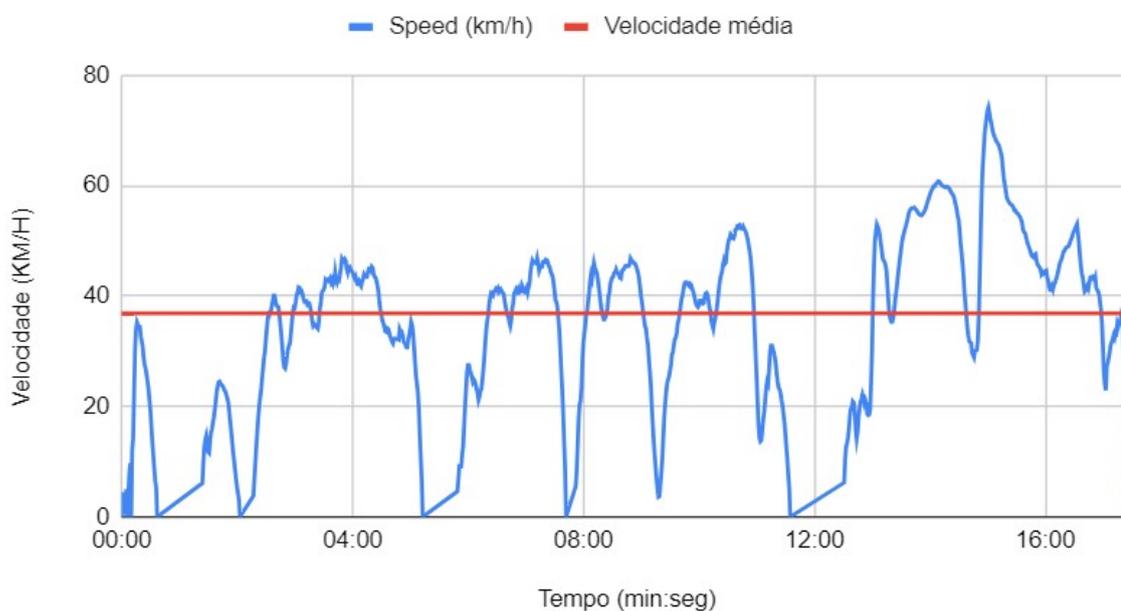
A seguir nas Figuras 18, 19, 20 e 21 estão expostos os testes no ciclo urbano.

Figura 18 – Teste 1 no Cross 2.0 XRE



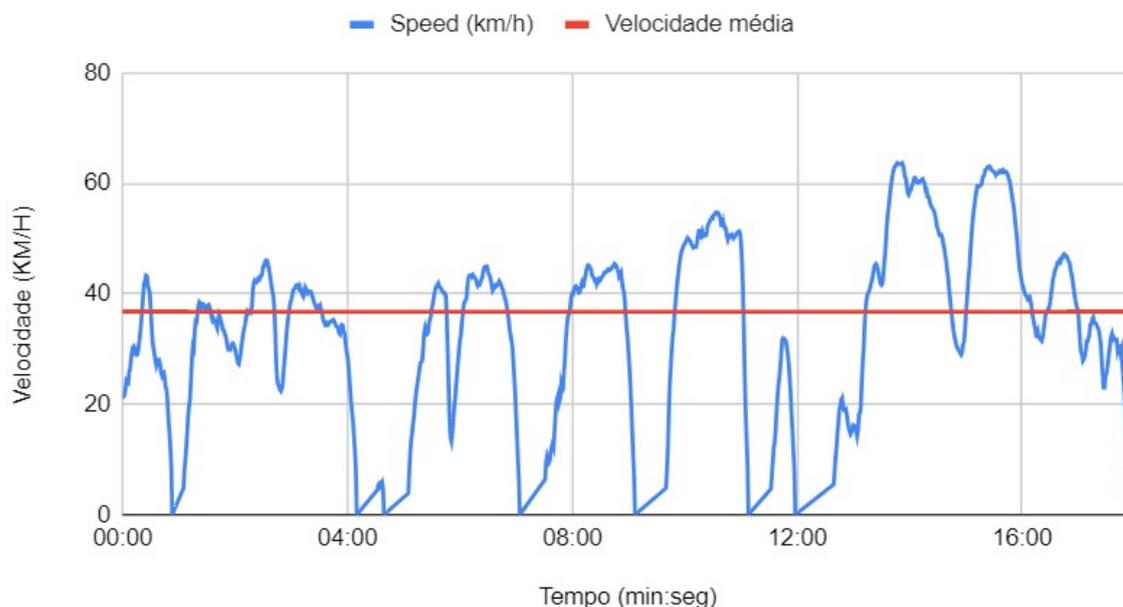
Fonte: Autor (2023)

Figura 19 – Teste 2 no Cross 2.0 XRE



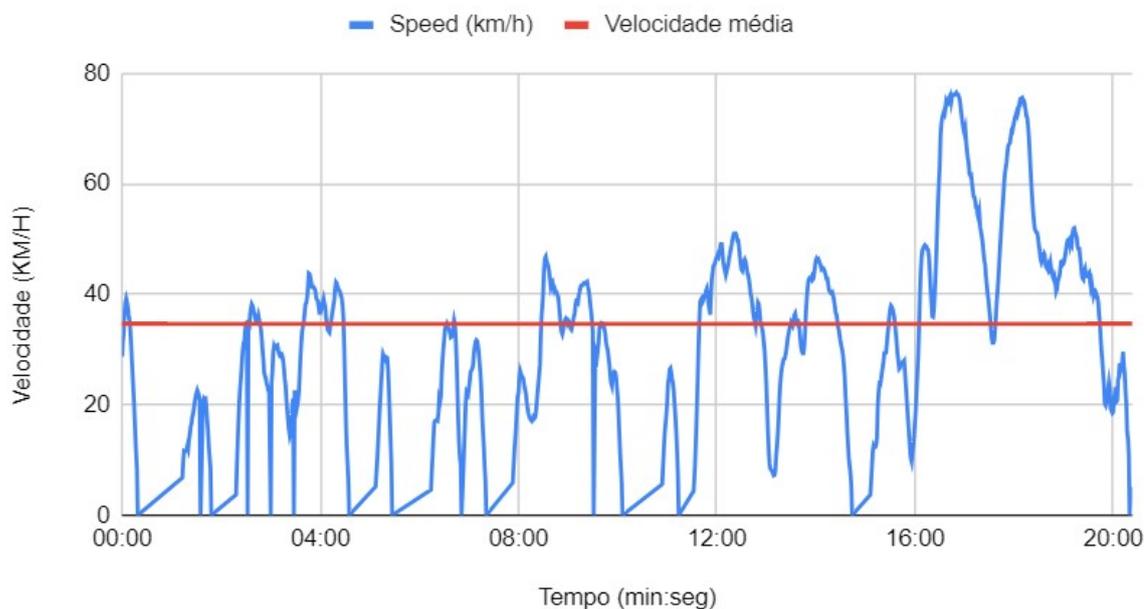
Fonte: Autor (2023)

Figura 20 – Teste 1 no Cross 1.8 XRX



Fonte: Autor (2023)

Figura 21 – Teste 2 no Cross 1.8 XRX



Fonte: Autor (2023)

Ao aplicar a abordagem cinemática proposta por Andrade (2020), conseguimos obter informações significativas que nos permitem derivar algumas conclusões. A tabela 3 apresenta os resultados do primeiro teste do modelo 2.0 convencional e o primeiro teste da versão Híbrida, ambas situações foram na cidade e com trânsito.

Tabela 3 – Dados da simulação no circuito cidade com trânsito

	Cross 2.0 XRE	Cross 1.8 XRX Híbrido
Distancia total percorrida (m)	9044,91	9174,83
Tempo em velocidade cte (s)	222	255
Tempo andando (s)	1148	891
Porcentagem do tempo andando	98,03 %	99,11%
Porcentagem do tempo com velocidade cte	18,95 %	28,36 %
Porcentagem do tempo acelerando	39,28 %	35,15 %
Porcentagem do tempo desacelerando	39,79 %	35,59 %
Porcentagem do tempo parado	01,96 %	0,88%
Velocidade media com base no tempo total (km/h)	27,80	36,74
Veloc média com base no tempo andando (km/h)	28,36	37,07
Veloc maxima do percurso (km/h)	69,60	63,7
Desvio padrão velocidade	8,86	10,92
Acel média positiva (m/s <sup>2</sup> )	0,53	0,41
Desvio padrão aceleração	0,71	0,47
Numero de paradas	22	8
Distancia média entre paradas (m)	240,45	1146,85
Paradas por km	2,43	0,87

Fonte: Autor (2023)

Na Tabela 4, estão disponibilizados os resultados obtidos no segundo teste realizado com o modelo 2.0 convencional, bem como no segundo teste da versão Híbrida. Ambos os testes ocorreram em cenários urbanos, durante o final de semana, quando o tráfego estava mais leve.

Tabela 4 – Dados da simulação no circuito cidade sem trânsito

	Cross 2.0 XRE	Cross 1.8 XRX Híbrido
Distancia total percorrida (m)	9067,05	8777,8
Tempo em velocidade cte (s)	211	160
Tempo andando (s)	876	897
Porcentagem do tempo andando	98,98 %	98,35%
Porcentagem do tempo com velocidade cte	23,84 %	17,54 %
Porcentagem do tempo acelerando	35,93 %	37,60 %
Porcentagem do tempo desacelerando	39,20 %	43,20 %
Porcentagem do tempo parado	01,01 %	1,64 %
Velocidade media com base no tempo total (km/h)	36,88	34,64
Veloc média com base no tempo andando (km/h)	37,26	35,22
Veloc maxima do percurso (km/h)	74,20	76,50
Desvio padrão velocidade	11,00	10,64
Acel média positiva (m/s <sup>2</sup> )	0,46	0,62
Desvio padrão aceleração	0,52	0,98
Numero de paradas	7	15
Distancia média entre paradas (m)	1295,29	585,90
Paradas por km	0,77	1,70

Fonte: Autor (2023)

Com base nas informações extraídas dos gráficos dos testes urbanos, representados nas Tabelas 3 e 4, podemos chegar à conclusão de que, no que diz respeito à cinemática, os carros exibem um desempenho praticamente idêntico. Pequenas variações observadas podem ser atribuídas ao número maior de paradas entre um teste e outro. No geral, ao analisar ambos os testes, fica evidente que não há um carro que se destaque significativamente em termos de desempenho na cidade, ao contrário do que foi observado nos testes de estrada.

## 5.2 Testes de consumo

### 5.2.1 Percurso estrada

Os testes de consumo na estrada foram realizados do bairro Curado, em Recife, até a entrada da cidade de Vitória De Santo Antão, ambas localizadas no estado de Pernambuco. O consumo foi zerado no início do teste, e foi registrado ao término do percurso por meio de fotografias. Nesse contexto, foram efetuados dois testes de consumo referentes ao automóvel convencional (XRE) e um ao híbrido (XRX).

O teste de consumo 1, no que tange ao primeiro teste do automóvel XRE, foi realizado no dia 18/03/2023, cujo resultado está demonstrado na figura abaixo (Figura 22).

Figura 22 – Teste 1 consumo estrada Cross 2.0 XRE



Fonte: Autor (2023)

No segundo teste do XRE, realizado no mesmo trajeto no dia 04/04/2023, foi obtido

um resultado final inferior, demonstrado na Figura 23. O consumo foi novamente zerado no início do teste, e a foto foi tirada logo no término do percurso. É possível notar que, no segundo teste, a Trip A (hodômetro parcial) foi zerada para marcar a distância percorrida.

Figura 23 – Teste 2 consumo estrada Cross 2.0 XRE



Fonte: Autor (2023)

Foi realizado o primeiro teste com o Corolla Cross Híbrido, como indicado na figura 24, seguindo o mesmo percurso, com duas pessoas a bordo e com o mesmo motorista dos testes anteriores (o autor). É válido ressaltar que, apesar de ter sido realizado apenas um teste no automóvel híbrido, devido a limitação de recursos financeiros, todos os testes na estrada foram realizados sem trânsito intenso, o que acarreta em uma maior confiabilidade no resultado encontrado.

Figura 24 – Teste 1 consumo estrada Cross 1.8 XRX



Fonte: Autor (2023)

### 5.2.2 Percurso cidade

O teste na cidade foi realizado em Recife, do bairro do Rosarinho até a Universidade Federal de Pernambuco, em duas situações de tráfego diferentes, sendo uma durante dia de semana em horário de pico, e outra durante o final de semana, em que é possível encontrar menor fluxo de veículos. O consumo foi zerado no início do teste, e foi registrado por meio de fotografia ao término do percurso.

Dito isso, é possível visualizar o resultado do primeiro teste obtido na cidade com o Corolla não híbrido, realizado no dia 04/08/2023, em horário de maior fluxo durante a semana, através da Figura 25.

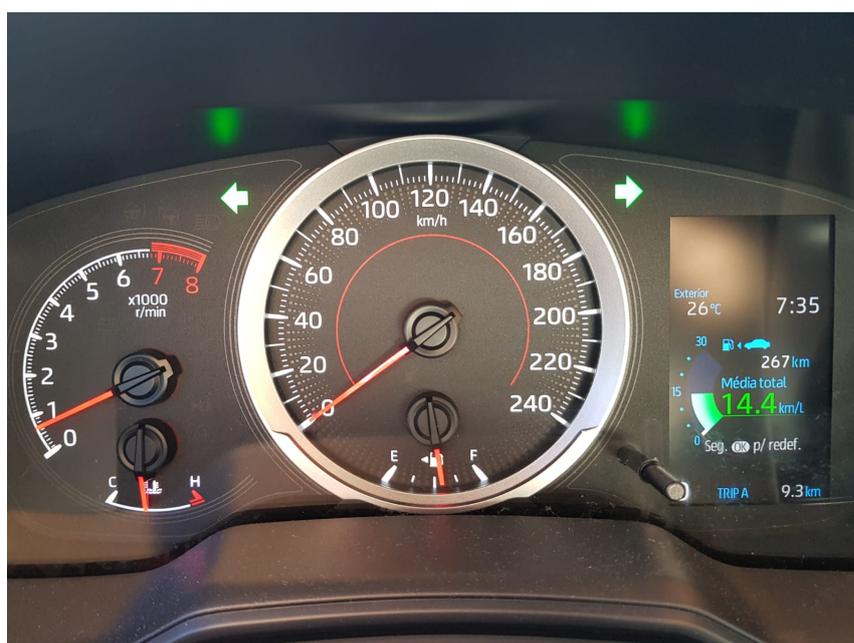
Figura 25 – Teste 1 consumo cidade Cross 2.0 XRE



Fonte: Autor (2023)

No segundo teste do Corolla não híbrido, realizado no dia 05/08/2023 durante o final de semana, o resultado final obtido foi mais satisfatório. O consumo foi novamente zerado no início do teste, e registrado logo no término do percurso, como fica claro na Figura 26.

Figura 26 – Teste 2 consumo cidade Cross 2.0 XRE



Fonte: Autor (2023)

O primeiro teste de consumo do Corolla Cross Híbrido foi realizado no mesmo trajeto, na cidade, no dia 04/09/2023, durante a semana em horário de maior movimentação de veículos. O consumo e a trip foram zerados no início do teste e registrados logo no término do percurso, como demonstra a Figura 27.

Figura 27 – Teste 1 consumo cidade Cross 1.8 XRX



Fonte: Autor (2023)

Sabe-se que no híbrido em velocidades mais baixas, o motor elétrico e a bateria tem capacidade o suficiente para mover o veículo. Em carros híbridos, parte da energia usada vem das frenagens, que regeneram a energia térmica que seria perdida no atrito das pastilhas com os discos de freio, transformando-a em energia elétrica para a bateria. Portanto, o carro consegue andar e parar, especialmente nos grandes centros, regenerar mais energia para as baterias. A partir disso, os híbridos se mantêm por mais tempo movendo o carro apenas com a energia elétrica, sem exigir do motor a combustão como gerador, justificando o excelente consumo alcançado na cidade.

O teste de consumo 2 foi realizado no mesmo trajeto, na cidade, com o Corolla híbrido, no dia 06/08/2023. Novamente de forma proposital o teste foi feito no final de semana sem trânsito. O consumo foi novamente zerado no início do teste e registrado no término do teste (figura 28), observe que o consumo foi levemente pior, mostrando como o híbrido funciona de forma mais econômica em período de trânsito.

Figura 28 – Teste 2 consumo cidade Cross 1.8 XRX



Fonte: Autor (2023)

### 5.3 Custos

#### 5.3.1 Custos com revisões periódicas

Ambos os veículos foram retirados da concessionária no mês de Maio do ano de 2021, e desde então têm sido submetidos a um acompanhamento metucioso em todas as suas revisões na oficina da Toyolex localizada na Avenida Rui Barbosa, situada em Recife, no estado de Pernambuco. Abaixo, através da Tabela 5, apresentamos os valores relativos a cada manutenção realizada a cada 10.000 quilômetros percorridos. Conforme as diretrizes da fabricante, tais intervenções são recomendadas a cada ano ou a cada dez mil quilômetros rodados, garantindo, assim, a durabilidade do produto e a manutenção da garantia de 5 anos do produto.

Tabela 5 – Tabela comparativa com os valores das revisões

	<b>Cross 2.0 XRE</b>	<b>Cross 1.8 XRX Híbrido</b>
<b>10.000 KM</b>	R\$ 516,63	R\$ 851,63
<b>20.000 KM</b>	R\$ 918,00	R\$ 839,01
<b>30.000 KM</b>	R\$ 812,00	R\$ 864,78
<b>40.000 KM</b>	R\$ 1.556,85	R\$ 1.694,33
<b>50.000 KM</b>	R\$ 761,17	R\$ 793,09
<b>Soma total:</b>	R\$ 4.564,65	R\$ 5.042,84

Fonte: Autor (2023)

### 5.3.2 Desvalorização

Nessas análises, não levaremos em consideração os efeitos da inflação vigente no país. Em maio de 2021, o Corolla Cross XRE 2.0 2022 foi adquirido ao valor de R\$ 149.900,00, enquanto a versão híbrida XRX 1.8 Special Edition 2022 demandou um investimento de R\$ 184.000,00. A seguir (Figuras 29 e 30), será apresentado os valores atualizados da Tabela FIPE referentes a setembro de 2023.

Figura 29 – Valor da tabela fiipe do Corolla Cross 2022 XRE

Mês de referência:	setembro de 2023
Código Fipec:	002203-9
Marca:	Toyota
Modelo:	Corolla Cross XRE 2.0 16V Flex Aut.
Ano Modelo:	2022 Gasolina
Autenticação	hxqmbz76kdmn
Data da consulta	domingo, 10 de setembro de 2023 18:36
<b>Preço Médio</b>	<b>R\$ 147.888,00</b>

Fonte: Tabela Fipec (2023)

Ao considerarmos o período de utilização de dois anos e quatro meses, o automóvel não híbrido sofreu uma desvalorização de R\$2.012,00, o que representa 1,34% no

total, ou 0,57% anualmente.

Figura 30 – Valor da tabela fiipe do Corolla Cross 2022 XRX Híbrido

Mês de referência:	setembro de 2023
Código Fiipe:	002204-7
Marca:	Toyota
Modelo:	Corolla Cross XRX 1.8 16V Aut. (Híbrido)
Ano Modelo:	2022 Gasolina
Autenticação	jx0kym1xq7dmn
Data da consulta	domingo, 10 de setembro de 2023 18:28
<b>Preço Médio</b>	<b>R\$ 174.574,00</b>

Fonte: Tabela Fiipe (2023)

No caso do modelo híbrido, é válido salientar que ele tende a experimentar uma depreciação mais significativa, possivelmente devido à apreensão do mercado em relação ao eventual custo de substituição da bateria no futuro. A desvalorização total foi de R\$9.426,00, o que equivale a 5,12% ao longo de 28 meses de utilização, ou 2,19% anualmente.

### 5.3.3 Custo com combustível

Dos testes anteriores, pode ser definido um consumo médio de 12,35 Km/L na estrada e de 10,2 Km/L na cidade (horário de pico), para o Corolla Cross XRE e um consumo de 17,9 Km/L na estrada e de 24,9 Km/L na cidade (horário de pico), para a versão híbrida XRX, juntamente com a kilometragem média rodada de 1.786 KM por mês (50.000 km em 28 meses) e um valor de combustível de R\$5,89 o litro de gasolina(setembro de 2023).

Ao considerarmos uma utilização equilibrada, na qual metade da kilometragem é percorrida na cidade e a outra metade na estrada, os dados estão representados na Tabela 6 a seguir, observamos que o híbrido oferece uma economia em termos percentuais de 46,35%.

Tabela 6 – Custo mensal de combustível para um uso 50% estrada e 50% cidade

	Cross 2.0 XRE	Cross 1.8 XRX Híbrido
<b>Km/mês</b>	1786	1786
<b>Consumo médio estrada (Km/L)</b>	12,35	17,90
<b>Consumo médio cidade (Km/L)</b>	10,20	24,90
<b>Valor do combustível</b>	R\$ 5,89	R\$ 5,89
<b>Litros/mês (50% estrada e 50%cidade)</b>	159,86	85,75
<b>Custo mês:</b>	R\$ 941,56	R\$ 505,08

Fonte: Autor (2023)

Caso optemos por uma utilização mais voltada para a cidade, na qual 70% da quilometragem é realizada em áreas urbanas, enquanto os restantes 30% acontecem em estradas, os custos correspondentes podem ser visualizados na tabela 7 a seguir, observamos que o híbrido oferece uma economia melhor (51,70%).

Tabela 7 – Custo mensal de combustível para um uso 30% estrada e 70% cidade

	Cross 2.0 XRE	Cross 1.8 XRX Híbrido
<b>Km/mês</b>	1786	1786
<b>Consumo médio estrada (Km/L)</b>	12,35	17,90
<b>Consumo médio cidade (Km/L)</b>	10,20	24,90
<b>Valor do combustível</b>	R\$ 5,89	R\$ 5,89
<b>Litros/mês (30% estrada e 70%cidade)</b>	165,95	80,14
<b>Custo mês:</b>	R\$ 977,46	R\$ 472,04

Fonte: Autor (2023)

Por último, se decidirmos priorizar uma utilização mais voltada para estradas, na qual 30% da quilometragem é percorrida em áreas urbanas, enquanto os restantes 70% ocorrem em rodovias, os custos correspondentes podem ser observados na tabela 8 abaixo. Observamos que em termos percentuais essa foi a pior condição para o híbrido, economizando 40,58% em relação a versão convencional.

Tabela 8 – Custo mensal de combustível para um uso 70% estrada e 30% cidade

	Cross 2.0 XRE	Cross 1.8 XRX Híbrido
<b>Km/mês</b>	1786	1786
<b>Consumo médio estrada (Km/L)</b>	12,35	17,90
<b>Consumo médio cidade (Km/L)</b>	10,20	24,90
<b>Valor do combustível</b>	R\$ 5,89	R\$ 5,89
<b>Litros/mês (70% estrada e 30%cidade)</b>	153,76	91,36
<b>Custo mês:</b>	R\$ 905,65	R\$ 538,12

Fonte: Autor (2023)

Ao examinarmos os dados das Tabelas 6, 7 e 8, podemos concluir que possuir um veículo híbrido é mais vantajoso em termos de custos com combustível. A economia pode variar de 40,58% para aqueles que percorrem a maior parte de sua quilometragem em estradas, chegando a 51,70% por mês para aqueles que predominantemente dirigem na cidade.

#### 5.3.4 Payback

Payback é um indicador do tempo de retorno de um investimento e um método de tomada de decisões que considera o tempo para obtenção dos valores e o montante que deverá ser retirado dos caixas.

Nesse cálculo de payback (Tabela 9), abordaremos em quantos meses a diferença de valor investida na versão Híbrida retornaria, considerando apenas a economia com combustível (maior diferença financeira), utilizando os mesmos 1.786 Km por mês de referência. Em setembro de 2023, a diferença entre o Corolla Cross XRE 2.0 e a versão híbrida XRX 1.8 é de R\$35.380,00.

Tabela 9 – Payback

	Economia que o híbrido gera com combustível (mês)	Payback (meses)	Payback (Anos)
(50% estrada e 50% cidade)	R\$ 436,48	81	7
(30% estrada e 70% cidade)	R\$ 505,43	70	6
(70% estrada e 30% cidade)	R\$ 367,53	96	8
(100% cidade)	R\$ 608,86	58	5

Fonte: Autor (2023)

Com as informações apresentadas, adquirir um veículo híbrido pode se tornar uma escolha mais sensata à medida que o veículo é utilizado principalmente em áreas urbanas. No entanto, mesmo nesse cenário, percorrendo uma distância de 1.786 km por mês, levaria em torno de seis anos para recuperar o valor investido, levando em conta que 70% da condução ocorre na cidade e 30% em estradas. Considerando uma condução 100% na cidade, com aproximadamente 5 anos, teríamos o retorno do valor investido.

## 6 CONCLUSÕES

Em conclusão, examinamos as características e o desempenho do Corolla Cross híbrido e não híbridos em diversos cenários e condições. Os dados e análises realizadas revelam que a escolha entre esses dois tipos de veículos depende das necessidades e preferências individuais do motorista.

Do ponto de vista da economia de combustível, especialmente em áreas urbanas com tráfego intenso, os carros híbridos se destacam, proporcionando uma notável economia em custos de combustível. Além disso, eles oferecem um ambiente mais silencioso quando operando apenas no modo elétrico e uma experiência de condução mais ecologicamente responsável. Por outro lado, os carros não híbridos ainda têm seu lugar, especialmente para aqueles que fazem viagens frequentes em estradas, onde os motores a combustão podem ser mais eficazes e oferecer uma vantagem em termos de desempenho em alta velocidade, trazendo mais segurança em ultrapassagens nas rodovias.

Em última análise, a escolha entre um veículo híbrido e não híbrido deve levar em consideração as necessidades individuais, o perfil de condução, o orçamento e as preferências pessoais. Ambos os tipos de veículos têm suas próprias vantagens e desvantagens, e a decisão final deve ser baseada em uma análise cuidadosa das prioridades de cada motorista. À medida que a tecnologia automotiva continua a evoluir, é fundamental manter-se atualizado sobre as últimas inovações para tomar uma decisão informada que atenda às suas necessidades de mobilidade e sustentabilidade.

No presente trabalho foram identificados alguns aspectos considerados relevantes para abordagens mais detalhadas. Assim, foram citados temas que poderão ser objeto de uma futura investigação:

- Investigar a vida útil real das baterias de carros híbridos, analisando como a capacidade da bateria se degrada ao longo dos anos e quantos anos a bateria pode durar antes de precisar de substituição.
- Avaliar o custo atual e futuro da substituição da bateria em carros híbridos e como esse custo pode afetar a propriedade a longo prazo.
- Estudar como a depreciação dos carros híbridos se compara aos carros não híbridos ao longo do tempo, considerando a idade, a quilometragem e a condição geral.

- Investigar como o uso de carros híbridos e não híbridos afeta o meio ambiente em termos de emissões de CO<sub>2</sub> e outros poluentes ao longo de vários anos.
- Acompanhar e analisar as inovações tecnológicas relacionadas a carros híbridos e não híbridos, como avanços na eficiência dos motores, sistemas de bateria, carregamento e automação.
- Realizar pesquisas de mercado para entender a percepção dos consumidores em relação a carros híbridos e não híbridos, considerando fatores como sustentabilidade, custos e preferências pessoais.
- Estudar como as políticas governamentais, como incentivos fiscais e restrições de emissões, afetam a adoção e a aceitação de carros híbridos e não híbridos ao longo do tempo.
- Explorar a evolução da mobilidade elétrica, incluindo carros elétricos puros, e como isso pode afetar a demanda por carros híbridos e não híbridos.

Estas são apenas algumas sugestões de tópicos que podem ser explorados em trabalhos futuros relacionados a carros híbridos e não híbridos. Cada um desses tópicos oferece oportunidades para uma análise mais profunda e insights valiosos à medida que a tecnologia automotiva continua a evoluir.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, G. M. S. d. Desenvolvimento de método simplificado de construção e análise de ciclos de condução locais para carros e motos: um estudo de caso no horário fora de pico na cidade do Recife. Universidade Federal de Pernambuco, 2020.
- BARAN, R. A introdução de veículos elétricos no Brasil: avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade. 2012.
- BRUNETTI, F. *Motores de Combustão Interna-Vol. 1*. [S.l.]: Editora Blucher, 2018.
- CARVALHO, Y. de A.; GONÇALVES, L. M.; CIPRIANO, R. Z.; MACEDO, F. A. S.; SANTOS, L. Viabilidade econômica dos veículos híbridos: Uma análise comparada baseada no payback. *Gestão da Produção em Foco Volume 44*, p. 6, 2020.
- CECCHINI, K. *Setor automotivo brasileiro: evolução da estrutura produtiva e sua importância regional nos anos 90*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2005.
- DENTON, T. *Veículos elétricos e híbridos*. [S.l.]: Editora Blucher, 2018.
- ENRIGHT . *Toyota Prius [XW10] (2000 - 2003) used car review*. 2008. Online. Disponível em: <[https://www.rac.co.uk/drive/car-reviews/toyota/prius-xw10/prius-\[xw10\]-2000-2003/](https://www.rac.co.uk/drive/car-reviews/toyota/prius-xw10/prius-[xw10]-2000-2003/)>.
- Feldman . *Consumo de combustível: posso confiar no resultado do computador de bordo? - Leia mais em <https://autopapo.uol.com.br/blog-do-boris/consumo-de-combustivel-computador-bordo/>*. 2019. Online. Disponível em: <<https://autopapo.uol.com.br/blog-do-boris/consumo-de-combustivel-computador-bordo/>>.
- FERREIRA, J. P.; DIAS, M. J. Veículos elétricos e híbridos: História e perspectivas para o Brasil. *ETIS-Journal of Engineering, Technology, Innovation and Sustainability*, v. 3, n. 1, p. 40–54, 2021.
- Honda . *Civic Híbrido*. 2023. Online. Disponível em: <<https://www.honda.com.br/automoveis/civic>>.
- Lucena . *Os prós e contras dos carros elétricos*. 2018. Online. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/os-pros-e-contras-do-carro-eletrico>>.
- MANAGI, S. *Analysis of alternative fuel vehicles by disaggregated cost benefit*. [S.l.], 2012.
- PASSOS . *Pleno, 48V e plug-in: os diferentes tipos de carros híbridos e elétricos*. 2023. Online. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/carros-eletricos/pleno-48v-e-plug-in-os-diferentes-tipos-de-carros-hibridos-e-eletricos>>.
- PRADO, P. I. B. Motores híbridos: um estudo de custos e benefícios. Fundação de Ensino e Pesquisa do Sul de Minas, 2019.

SHERMAN. *1886 Benz Patent Motorwagen Sparked a Revolution*. 2020. Online. Acessado em 02/10/2023. Disponível em: <<https://www.caranddriver.com/reviews/a33323170/benz-patent-motorwagen-drive/>>.

SILVEIRA, F. L. da. Máquinas térmicas à combustão interna de otto e de diesel. *Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande Do Sul*, 2008.

THIELLET, L. E. V. Análise de viabilidade econômica de um automóvel híbrido. Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

TOYOTA. *Manual do Proprietario Corolla Cross*. [S.l.]: Toyota, 2022.

VAZ, L. F. H.; BARROS, D. C.; CASTRO, B. H. R. d. Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2015.

VONBUN, C. Impactos ambientais e econômicos dos veículos elétricos e híbridos plug-in: uma revisão da literatura. Texto para Discussão, 2015.

WOLFFENBÜTTEL, R. F. Políticas setoriais e inovação: entraves e incentivos ao automóvel elétrico no brasil. *Revista Brasileira de Inovação*, SciELO Brasil, v. 21, 2022.