UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RENNO DE HOLANDA SOUSA

MODELAGEM DE UM VEÍCULO ELÉTRICO DE ALCANCE ESTENDIDO (REEV) UTILIZANDO UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO DE CARGA HOMOGÊNEA (HCCI) A ETANOL

FORTALEZA
2024

RENNO DE HOLANDA SOUSA

MODELAGEM DE UM VEÍCULO ELÉTRICO DE ALCANCE ESTENDIDO (REEV) UTILIZANDO UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO DE CARGA HOMOGÊNEA (HCCI) A ETANOL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis

Orientador: Prof. Dr. André Valente Bueno

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S698m Sousa, Renno de Holanda.
Modelagem de um veículo elétrico de alcance estendido (REEV) utilizando um motor de ignição por compressão de carga homogênea (HCCI) a etanol / Renno de Holanda Sousa. – 2024.
65 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. André Valente Bueno.

1. Etanol. 2. HCCI. 3. Eletrificação. 4. REEV. 5. Emissões. I. Título.

CDD 620.1

RENNO DE HOLANDA SOUSA

MODELAGEM DE UM VEÍCULO ELÉTRICO DE ALCANCE ESTENDIDO (REEV) UTILIZANDO UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO DE CARGA HOMOGÊNEA (HCCI) A ETANOL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis

Aprovada em: 28 de Novembro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Valente Bueno (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Antonio Andrés Velásquez
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada. Renan e Renata, vocês sempre me inspiraram a ser alguém melhor. Gabriela e João Luís, obrigado por sempre trazerem o melhor de mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado o dom da vida.

Ao meu orientador, Prof. André Valente Bueno, cuja orientação foi essencial para o sucesso deste trabalho. Seu apoio, conhecimento e paciência foram fundamentais ao longo de todo o processo de desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu pai, José Renato de Brito Sousa, por sempre me inspirar a ser uma pessoa e um engenheiro melhor, sou muito feliz em poder seguir os passos dele em uma carreira acadêmica.

Aos meus irmãos, Renan de Holanda Sousa e Renata de Holanda Sousa, por todo o companheirismo a suporte durante todos esses anos.

A minha esposa Maria Gabriela Pimentel e ao meu enteado João Luís Pimentel, por sempre me fazerem buscar ser um companheiro e um pai melhor.

Aos amigos do Laboratório de Hidrogênio Verde e Máquinas Térmicas (LHMT) por todo o apoio e auxílio durante os anos de mestrado. A amizade e o companheirismo de todos foi essencial para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos mestrandos, Claudecir Junior, Francisco Elmo, Helton Carlos e Guilherme Fontenele, por todo o apoio e ajuda durante todo o percurso do mestrado. Sem vocês eu não teria conseguido.

Aos meus amigos de escola, Alysson Nunes, Caio Fortier, Daniel Salmito, Rafael Soares, Rafael Rocha e Samuel Machado por sempre estarem presentes durante as importantes etapas da minha vida como Engenheiro Mecânico.

Ao amigo Bruno Correia Garcia por toda a paciência e passagem de conhecimento sobre os assuntos abordados nesse trabalho.

Agradeço aos professores da banca pelas contribuições valiosas para o meu trabalho, pelas críticas construtivas com a intenção de enriquecer e melhorar o trabalho. Suas orientações foram de extrema importância para o crescimento dessa pesquisa e para obtenção dos resultados aqui apresentados.

Também sou grato ao programa Rota 2030 pela bolsa de formação, essencial para o desenvolvimento deste trabalho. A oportunidade proporcionada pelo programa permitiu a continuidade da minha pesquisa e o aprofundamento dos conhecimentos necessários para alcançar os resultados aqui apresentados. Agradeço pelo apoio financeiro e pelo incentivo ao aprimoramento da minha formação acadêmica e profissional.

"Sou uma parte de tudo aquilo que encontrei no meu caminho."

(Alfred Tennyson)

RESUMO

Este trabalho analisou o comportamento de diferentes configurações de um REEV, com a adoção de dois conjuntos de potência distintos alimentados por etanol: um operando como motor de ignição por faísca e outro operando em modo HCCI. As simulações ocorreram no software Realis IGNITE, e o tratamento das emissões foi realizado por um programa em Python. O modelo computacional do veículo convencional apresentou resultados satisfatórios no consumo de combustível, com menos de 1% de erro de validação, enquanto o modelo do catalisador de três vias teve um erro máximo inferior a 3%. Os resultados obtidos com o conjunto de potência operando em modo HCCI também foram satisfatórios, com o mesmo apresentando um desempenho superior ao da outra configuração, com menor consumo de combustível e com emissões de poluentes que ficaram dentro dos limites reportados na literatura.

Palavras-chave: Etanol. HCCI. Eletrificação. REEV. Emissões

ABSTRACT

This study analyzed the behavior of different configurations of a REEV, adopting two distinct power sets fueled by ethanol: one operating as a spark-ignition engine and the other in HCCI mode. The simulations were performed in Realis IGNITE software, and the emissions treatment was conducted by a Python program. The computational model of the conventional vehicle showed satisfactory results in fuel consumption, with less than 1% validation error, while the three-way catalyst model had a maximum error of less than 3%. The results obtained with the power set operating in HCCI mode were also satisfactory, showing superior performance to the other configuration, with lower fuel consumption and pollutant emissions within the limits reported in the literature.

Keywords: Ethanol. HCCI. REEV. Emissions. Electrification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparativo entre os métodos de combustão. 20
Figura 2 – Variação das emissões com o EGR. 22
Figura 3 – Funcionamento do HCCI. 23
Figura 4 – Esquema de propulsão (REEV). 25
Figura 5 – Esquema de um REEV. 26
Figura 6 – Variação de NO, HC e CO no escape de um MCI de IF. 28
Figura 7 – Exemplo de um catalisador de três vias. 32
Figura 8 – Eficiência catalítica em função da razão ar-combustível. 32
Figura 9 – Ciclo de Condução FTP75 34
Figura 10 – Dinamômetro de Chassi 36
Figura 11 – Exemplo de uma instalação de testes de veículos utilizando um dinamômetro de chassi. 37
Figura 12 – Modelo de um REEV no *AVL-Cruise*. 38
Figura 13 – Modelo de um PHEV no *Realis IGNITE*. 38
Figura 14 – Modelo do REEV no *Realis IGNITE*. 48
Figura 15 – Bloco do MCI. 49
Figura 16 – Bloco do Veículo. 49
Figura 17 – Controle da Bateria. 50
Figura 18 – Controle do Motor elétrico (ME) e do Gerador Elétrico (GE). 50
Figura 19 – Modelo *Realis IGNITE* (BR10-Etanol). 51
Figura 20 – Mapas de desempenho do BR10 à Etanol: (a) Torque, (b) Consumo, (c) HC, (d) NO_X e (e) CO. 52
Figura 21 – Resultado da otimização do catalisador. 54
Figura 22 – Evolução do modelo computacional do catalisador ao longo gerações. . . . 54
Figura 23 – Eficiências catalíticas. 55
Figura 24 – Emissões tratadas (BR10-Etanol): (a) CO, (b) HC e (c) NO_X. 56
Figura 25 – Mapas de desempenho do BR10-HCCI à Etanol: (a) Torque, (b) Consumo, (c) HC, (d) NO_X e (e) CO. 59
Figura 26 – Emissões tratadas do BR10-HCCI à Etanol: (a) CO, (b) HC e (c) NO_x. . . . 60
Figura 27 – Comportamento da carga da bateria ao longo da simulação. 60

Figura 28 – Comportamento da carga da bateria ao longo da simulação: REEV x REEV-HCCI. 61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre as Taxas de Compressão (TC) em motores de Ignição por Faísca (IF) e de Ignição por Compressão (IC) 20
Tabela 2 – Comparativo entre os veículos elétricos. 25
Tabela 3 – Nº de Octano e de Cetano para os principais combustíveis. 26
Tabela 4 – Parâmetros para qualidade dos diferentes tipos de etanol. 27
Tabela 5 – Emissões de HC em motores de Ignição por Faísca (IF). 29
Tabela 6 – Proconve L7. 30
Tabela 7 – Informações BR10. 39
Tabela 8 – Informações Aerodinâmicas. 40
Tabela 9 – Dimensões. 40
Tabela 10 – Relação de Marchas. 41
Tabela 11 – Dados de entrada do Motor de Combustão Interna (MCI). 44
Tabela 12 – Dados de entrada do veículo. 44
Tabela 13 – Parâmetros de Otimização. 47
Tabela 14 – Consumo: Experimental x Simulação 53
Tabela 15 – Parâmetros otimizados para o catalisador. 53
Tabela 16 – Emissões (BR10): Experimental x Simulação 55
Tabela 17 – Variação do consumo e das emissões: BR10 x HCCI. 56
Tabela 18 – Valores relativos a rotação de 3.000 RPM. 57
Tabela 19 – Variação do consumo: BR10 x REEV. 57
Tabela 20 – Valores relativos a rotação de 2.500 RPM. 58
Tabela 21 – Variação do consumo: REEV x REEV-HCCI. 58
Tabela 22 – Emissões: REEV x REEV-HCCI. 58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BAS	*Belt-Alternator-Starter*
CCV	*Cycle-to-Cycle Variation*
CO	Monóxido de Carbono
CO_2	Dióxido de Carbono
EGR	*Exhaust Gas Recirculation* (Recirculação de Gases de Escape)
ES	Engenharia Simultânea
FC	*Fuel Consumption* (Consumo de combustível)
FTP-75	*Federal Test Procedure 75*
GE	Gerador Elétrico
GHGE	*Greenhouse Gas Emissions* (Gases do Efeito Estufa)
H_2O	Água
HC	Hidrocarbonetos
HCCI	*Homogeneous Charge Compression Ignition* (Ignição por Compressão de Carga Homogênea)
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IC	Ignição por Compressão
IF	Ignição por Faísca
LHMT	Laboratório de Hidrogênio Verde e Máquinas Térmicas
LTC	*Low Temperature Combustion*
MCI	Motor de Combustão Interna
ME	Motor elétrico
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MP	Material Particulado
N_2	Nitrogênio
NO_x	Óxidos de Nitrogênio
NVO	*Negative Valve Overlap*
PHEV	*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*
PME	Pressão Média Efetiva
Proconve	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
Promot	Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares

Proálcool	Programa Nacional do Álcool
REEV	*Range Extended Electric Vehicle* (Veículos Elétricos de Autonomia Estendida)
RMSE	*Root-mean-square deviation*
SACI	*Spark-Assisted Compression Ignition*
SOC	*State of Charge* (Estado de carga da bateria)
TC	Taxa de Compressão
VE	Veículos elétricos
VVT	*Variable Valve Timing* (Comando Variável de Válvulas)
WLTC	*Worldwide Harmonized Light duty Test Cycle*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17

2 OBJETIVOS 18

2.1 Objetivo geral 18

2.2 Objetivos específicos 18

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 19

3.1 Motores de Combustão Interna 19

3.2 Métodos de Combustão Avançada 20

3.2.1 EGR 21

3.2.2 HCCI 22

3.2.3 SACI 24

3.3 Métodos de Propulsão Alternativos 24

3.3.1 REEV 24

3.4 Etanol 26

3.4.1 Breve Histórico 26

3.4.2 Características e Regulamentação 27

3.5 Emissões 27

3.5.1 NO_x 27

3.5.2 Material Particulado (MP) 29

3.5.3 Hidrocarbonetos (HC) 29

3.5.4 Regulamentação 30

3.6 Catalisadores 31

3.7 Ciclos de Condução 32

3.7.1 FTP-75 33

3.7.2 Dinamômetro de Chassi 35

3.8 Simulação 1D 36

4 METODOLOGIA 39

4.1 Informações do Veículo 39

4.2 Obtenção de dados 41

4.3 Implementação do modo HCCI 41

4.4 Modelagem do REEV 42

4.4.1 *Bloco do MCI* 43
4.4.2 *Bloco do veículo* 44
4.5 **Controle** 45
4.6 **Modelagem do catalisador** 45
5 **RESULTADOS E DISCUSSÃO** 51
5.1 **Modelo Numérico x Modelo Experimental (BR10 à Etanol)** 51
5.2 **Validação do catalisador** 53
5.3 **Modelo BR10-HCCI à Etanol** 55
5.4 **Modelo de um REEV à Etanol** 57
5.5 **Modelo de um REEV-HCCI à Etanol** 57
6 **CONCLUSÃO** 62
REFERÊNCIAS 63

1 INTRODUÇÃO

Devido ao grande impacto ambiental causado pelo petróleo e seus derivados, que são utilizados amplamente como combustível nos setores de transporte e de geração de energia, as regulamentações com relação às emissões de poluentes têm se tornado mais rígidas. Devido a essas mudanças diversos países e empresas têm buscado realizar a sua substituição por fontes renováveis para o caso de geração de energia e em eletrificação e biocombustíveis para transporte. De acordo com a (Internacional Energy Agency, 2023) em 2021 o setor de transportes foi responsável pela emissão de 23% de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera. Tsukiji *et al.* (2023) destacam que apesar da busca por uma transição para veículo elétricos no setor de transportes, ainda existem grandes desafios a serem superados nos âmbitos técnico, econômico e social. Sem levar em consideração que essa transição será um grande desafio devido à necessidade de uma infraestrutura adequada para recarga das baterias e à demanda por materiais críticos para sua produção.

Segundo Leach *et al.* (2020) as previsões mais positivas demonstram que pelo menos 85% dos veículos automotores continuarão utilizando os Motores de Combustão Interna (MCI) e os combustíveis derivados de petróleo. Apesar dos avanços obtidos com a eletrificação de veículos, os combustíveis fósseis ainda são amplamente utilizados devido à sua alta densidade energética. Essas informações expõem a necessidade de aprimorar as tecnologias já existentes acerca dos MCI e dos combustíveis utilizados, buscando alternativas que possam reduzir as emissões de *Greenhouse Gas Emissions* (Gases do Efeito Estufa) (GHGE).

Uma dessas alternativas é a substituição dos combustíveis fósseis pelos biocombustíveis e a hibridização dos veículos, acoplando um Motor Elétrico (ME). De acordo com Wang *et al.* (2022a), Arcentales *et al.* (2023), Squalli (2024) e Branco *et al.* (2024), o etanol surge como uma opção viável para substituição da gasolina, por reduzir as emissões de GHGE e de outros poluentes quando misturado com a gasolina ou quando usado como um combustível puro, sendo apenas etanol. Em misturas, contendo 10% de Etanol + 90% de Gasolina, em volume, a redução das emissões de GHGE pode ser de 1%-10% e de outros poluentes, 6%-7%.

Nos últimos anos diversos trabalhos acerca dos *Range Extended Electric Vehicle* (Veículos Elétricos de Autonomia Estendida) (REEV) foram desenvolvidos e apresentaram resultados expressivos, com relação ao consumo de combustível e redução nas emissões de poluentes (WAHONO *et al.*, 2016), (ABIDIN *et al.*, 2021).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral modelar um REEV com o motor de combustão a Etanol operando em regime de *Homogeneous Charge Compression Ignition* (Ignição por Compressão de Carga Homogênea) (HCCI).

2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral desse trabalho, uma série de objetivos específicos devem ser alcançados. São eles

1. Desenvolvimento dos mapas de desempenho do MCI BR10;
2. Modelagem do catalisador de três vias;
3. Validação da simulação de um veículo a Etanol;
4. Modelagem de um veículo operando em regime HCCI à etanol;
5. Modelagem de um REEV convencional.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos com relação aos MCI, aos métodos avançados de combustão, ao etanol como combustível e suas emissões e à regulamentação de emissões para veículos automotores.

3.1 Motores de Combustão Interna

De acordo com Heywood (2018) os MCI podem ser classificados por diversos critérios, sendo:

- Aplicação;
- Forma Construtiva;
- Regime de Operação;
- Combustível;
- Ciclo de Operação;
- Método de Ignição;
- Design das Válvulas e localização;
- Design da Câmara de Combustão;
- Controle de Carga;
- Método de Resfriamento;
- Preparação da Mistura.

Com relação ao método de ignição, os de Ignição por Faísca (IF) e os de Ignição por Compressão (IC) são amplamente utilizados pela indústria automotiva devido à sua confiabilidade e elevado grau de amadurecimento. Durante o funcionamento do MCI por IF, a mistura ar-combustível é admitida no conjunto cilindro-pistão em uma dosagem ,já pré-definida e com o auxílio de uma faísca gerada pela vela de ignição a combustão é iniciada. Os MCI por IC funcionam de outra forma, o ar presente no conjunto cilindro-pistão é comprimido até atingir altas temperaturas, quando as mesmas são alcançadas, o combustível é injetado em forma de *spray* e acaba reagindo com o ar aquecido, causando a combustão. Devido a essas diferenças, os motores IC precisam trabalhar com uma maior Taxa de Compressão (TC) para que as temperaturas ideais para a combustão sejam atingidas com a compressão do ar; já os motores a IF devido ao auxílio da vela de ignição, necessitam de TC menores. Na Tabela 1 são mostrados os valores médios da TC para os dois casos apresentados acima e com combustíveis diferentes (BRUNETTI, 2018).

Tabela 1 – Comparativo entre as Taxas de Compressão (TC) em motores de Ignição por Faísca (IF) e de Ignição por Compressão (IC)

Taxa de Compressão		
IF		IC
Etanol Hidratado	Gasolina - E22	Diesel
10:1 até 14:1	8,5:1 até 13:1	15:1 até 24:1

Fonte: Adaptado de Brunetti (2018).

Segundo Krishnamoorthi *et al.* (2019), os MCI convencionais apresentam problemas com relação a suas emissões de , Material Particulado (MP) e de NOx, devido aos combustíveis utilizados, de origem fóssil e também pelas temperaturas elevadas no momento da combustão. No caso dos motores IF, ocorre uma grande geração de Hidrocarbonetos (HC) e de Monóxido de Carbono (CO), enquanto que para os motores IC, o problema passa a ser o MP e o NO_x. Tendo em vista as regulamentações cada vez mais rigorosas com relação as emissões, surge a necessidade pelo desenvolvimento de pesquisa na área de biocombustíveis e na de combustão em temperaturas mais baixas.

3.2 Métodos de Combustão Avançada

Dentre essas novas tecnologias que estão em desenvolvimento, Agarwal *et al.* (2017) destaca a *Low Temperature Combustion* (LTC), devido aos seus resultados promissores com relação as novas regulamentações acerca das emissões de poluentes além de atingir melhores eficiências térmicas quando comparado com os métodos tradicionais. Os seguintes métodos de combustão fazem parte do LTC:

- HCCI;
- *Spark-Assisted Compression Ignition* (SACI).

A Figura 1 realiza um comparativo entre os métodos de ignição convencionais com os métodos do LTC.

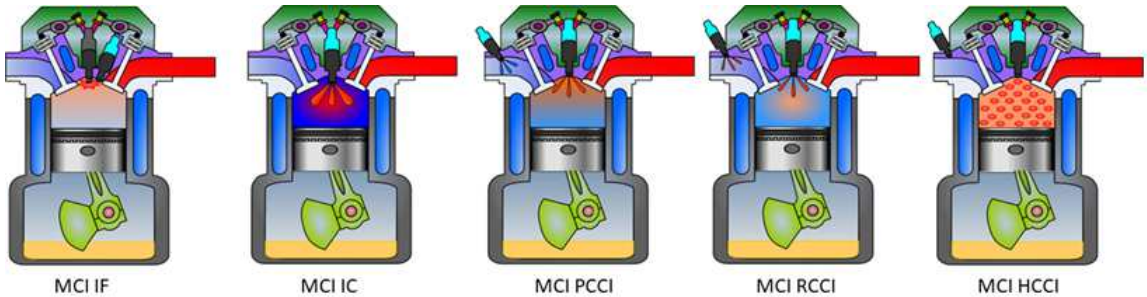


Figura 1 – Comparativo entre os métodos de combustão.
Fonte: Adaptado de Duan *et al.* (2021).

De acordo com Duan *et al.* (2021) os métodos que compõem o LTC operam em temperaturas mais baixas em relação aos métodos convencionais, para isso, várias técnicas podem ser utilizadas como, redução da TC, o *Variable Valve Timing* (Comando Variável de Válvulas) (VVT) para aumentar o atraso da ignição e um alto *Exhaust Gas Recirculation* (Recirculação de Gases de Escape) (EGR). Para esse último caso, a sua janela de funcionamento é muito estreita antes do consumo de combustível aumentar; além disso, ele atrapalha o processo da combustão e reduz a eficiência térmica do motor.

Nos subtópicos a seguir, será abordado o EGR, devido a sua importância e seu grande volume de aplicações em diversos trabalhos relevantes. Além disso, os três métodos de LTC listados anteriormente serão explicados com maiores detalhes.

3.2.1 EGR

Segundo Heywood (2018), a utilização de EGR em MCI tem como objetivo principal o de reduzir a temperatura com a qual a combustão ocorre, essa redução na temperatura traz como benefício a redução na produção de poluentes. Esse método funciona quando uma parte dos gases do pós-combustão são reutilizados em um novo processo de combustão, normalmente se mistura com o próprio ar que é coletado pela admissão do motor. Esse é o principal método utilizado por motores de IF para diminuir as emissões de NO_x. Apesar de reduções consideráveis nas emissões de NO_x quando operando de 10% a 25% de EGR, a taxa de combustão também acaba sendo afetada, causando problemas para a obtenção de uma combustão estável. A Figura 2 exemplifica a relação entre o EGR com as emissões de NO_x e de MP, conforme visto, é essencial achar um compromisso para atingir uma redução considerável de NO_x sem causar um aumento nas emissões de MP.

Brunetti (2018) explica que existem dois tipos de EGR, sendo eles:

- EGR Interno - É alçando através da técnica de cruzamento negativo de válvulas, ou *Negative Valve Overlap* (NVO), que necessita de certas alterações ao eixo de comando de válvulas. A grande vantagem desse método é devido a possibilidade de uma melhor conservação dos gases de escape, que são utilizados para auxiliar na ignição. Esse método tem se tornado mais acessível por conta dos avanços dos comandos de válvula variáveis ou VVT;
- EGR Externo - Um duto é utilizado para conectar o coletor do escape ao coletor da admissão, permitindo assim a recirculação dos gases de escape. A sua grande desvantagem

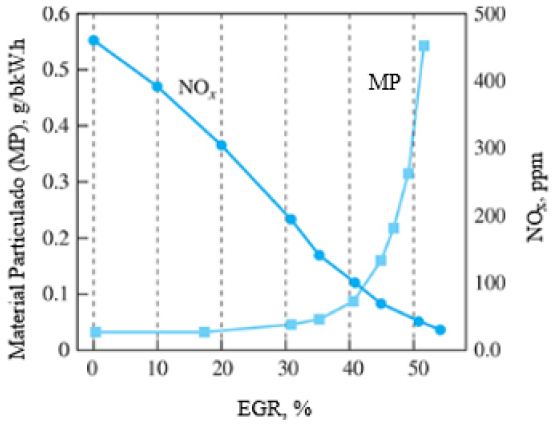


Figura 2 – Variação das emissões com o EGR.
Fonte: Adaptado de Heywood (2018).

é o fato de haver uma grande perda de energia por parte dos gases de escape. É um método que não é mais comumente utilizado, sendo substituído pelo anterior.

3.2.2 HCCI

Segundo Yao *et al.* (2009) esse método de combustão é caracterizado pelo fato de que a mistura de ar-combustível é realizada antes da combustão e que a combustão é atingida através da autoignição, devido ao aumento da temperatura dentro do conjunto cilindro-pistão devido a elevada TC. O HCCI se assemelha a IF por adotar a pré-mistura do combustível com o ar e também com a IC por contar com o auxílio de uma elevada TC para atingir maiores temperaturas, permitindo a autoignição. A Figura 3 mostra as etapas de funcionamento desse método.

Brunetti (2018) destaca que o início dos estudos envolvendo esse método, datam de meados da década de 70, onde a aplicação era feita em MCI de dois tempos. Esses estudos iniciaram devido às maiores exigências com relação as emissões de NO_X.Por esse método permitir o controle de torque pela composição da carga, é possível atingir a operação em condições não estranguladas. Além disso, são listados alguns métodos que auxiliam na obtenção da autoignição:

- Aquecimento do ar de admissão;
- Aumento da TC;
- Utilização de um combustível com propriedades que permitam a autoignição com uma maior facilidade;
- EGR.

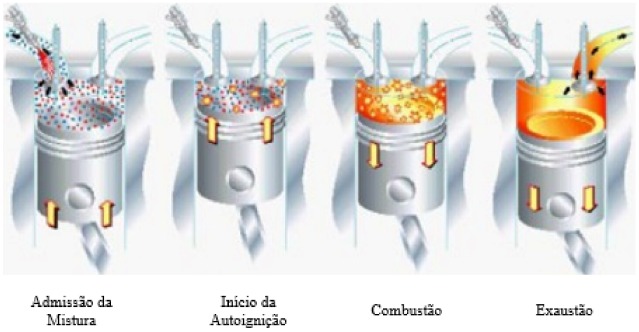


Figura 3 – Funcionamento do HCCI.
Fonte: Adaptado de Agarwal *et al.* (2017).

Onishi *et al.* (1979) e Noguchi *et al.* (1979) perceberam que esse método sofre de uma falta de controle do processo de ignição e de uma faixa de operação limitada. Esse é apenas um dos obstáculos para implementação em larga-escala do HCCI, segundo Yao *et al.* (2009), os outros são:

- Controle da Combustão: Diferentemente dos métodos convencionais de combustão, o HCCI não possui um controle inicial da combustão, já que o responsável pelo seu início é a autoignição, que por outro lado depende de uma série de fatores como, propriedades do combustível utilizado, concentração do combustível, homogeneidade da mistura ar-combustível, TC, temperatura de admissão, temperatura do motor e algumas outras propriedades;
- Ruído Elevado: Em cargas de operação elevadas, pode haver um aumento na pressão interna do conjunto cilindro-pistão, que podem ocasionar danos ao motor, além de provocar o aumento do ruído do motor;
- Emissões elevadas de CO e : Devido às temperaturas mais baixas (1400 K - 1500 K) durante a combustão, o combustível não é totalmente consumido, resultando em um aumento nas emissões de CO, por não ocorrer a sua oxidação e transformação em CO_2 e de .
- Faixa de Operação: Em cargas muito baixas a sua operação é bastante comprometida, devido a baixa energia térmica presente para iniciar a autoignição da mistura, esse fato em conjunto com as emissões de CO e acabam tornando o HCCI menos atrativo em relação a outros métodos. Além disso é preciso expandir sua faixa para cargas altas.
- Partida a frio: Por utilizar os gases de exaustão para auxílio na nova ignição, a primeira partida do dia do motor ou a partida fria impossibilita a utilização do método HCCI.

Devido a essas limitações com relação a sua operação, esse método só se torna viável

quando utilizado com um outro método de combustão, por exemplo, em unidades de potência híbridas ou em conjunto com o método de IF. Diante desse cenário surge o método SACI, que busca mitigar as deficiências do HCCI.

3.2.3 SACI

Hunicz *et al.* (2020) explica que a adição de uma vela de ignição para o auxílio da autoignição, caracteristica do método HCCI, torna todo esse processo mais estável, com relação a Pressão Média Efetiva (PME) sem ter aumento nas emissões de NO_x. Entretanto é importante salientar que no caso de misturas muito pobres, a combustão se torna mais lenta.

Em um estudo conduzido por Daw *et al.* (2007), foram observadas as variações de ciclo a ciclo, ou *Cycle-to-Cycle Variation* (CCV), durante a liberação de calor para a utilização de misturas diluidas, operando em HCCI e em SACI. Foram encontradas diferenças entre eles e também que seria possível fazer a previsão do calor liberado a cada ciclo, se baseando nos ciclos anteriores. Outra questão importante é a da queima parcial do combustível, de acordo com Larimore *et al.* (2012), em condições estequiométricas o combustível que não foi queimado, participa dos ciclos seguintes até ser totalmente queimado.

Realizando uma comparação entre o método HCCI e o SACI, o primeiro fornece uma eficiência superior e menores emissões de NO_x, mas necessita ser utilizado em conjunto com métodos convencionais, conforme explicado no subtópico anterior. Já o segundo possui uma maior maturidade e já é utilizada por grandes fabricantes de automóveis, com o controle da pressão interna do cilindro sendo uma chave para essa questão (ADCOCK, 2017).

3.3 Métodos de Propulsão Alternativos

3.3.1 REEV

De acordo com Denton (2018), Lu *et al.* (2023), Karvountzis-Kontakiotis *et al.* (2018) e Guo *et al.* (2023) um veículo REEV funciona sendo alimentado por uma bateria que recebe energia de um gerador acoplado a um MCI. Diferentemente de outros Veículos elétricos (VE), os REEV possuem uma autonomia de bateria menor, de apenas 80 km. No entanto, essa autonomia é estendida devido à ligação com o MCI e o movimento sempre será fornecido pelo ME. Ainda destaca-se que a adição de um motor elétrico permite, possuindo um sistema de controle adequado, que as emissões e consumo de combustível sejam reduzidos, sem perder

potência. A Figura 4 mostra graficamente o sistema de propulsão desse tipo de veículo.

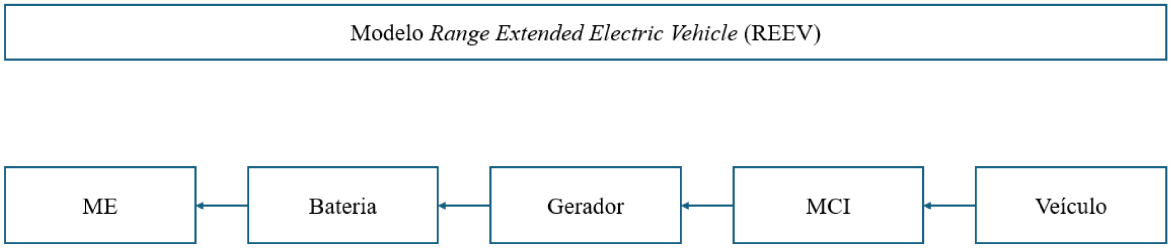


Figura 4 – Esquema de propulsão (REEV).
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Tabela 2, Wang *et al.* (2022b) faz o comparativo entre os diferentes tipos de VE, com relação ao seu tipo de propulsão, carregamento da bateria, tamanho da bateria, alcance, tamanho do MCI e o consumo de combustível.

Tabela 2 – Comparativo entre os veículos elétricos.

Tipo	HEV Convencional	PHEV	REEV
Propulsão	MCI e ME	MCI e ME	MCI e ME
Carregamento de bateria	Pelo MCI Freio regenerativo	Pelo MCI Freio regenerativo Eletricidade pela rede	Pelo MCI Freio regenerativo Eletricidade pela rede
Tamanho da bateria	Pequeno/Médio	Médio	Médio
Alcance	Pequeno/Médio	Grande	Médio/Grande
Dimensão MCI	Pequeno/Médio	Pequeno/Médio	Pequeno/Médio
Consumo de combustível	Médio	Baixo	Baixo

Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2022b).

De acordo com Tate *et al.* (2008) o funcionamento do REEV se dá quando o *State of Charge* (Estado de carga da bateria) (SOC) fica abaixo de uma porcentagem pré-definida. Nessa condição, o MCI entra em ação, fornecendo a eletricidade para recarregar a bateria ou para continuar a operação do veículo.

Abidin *et al.* (2021) destaca um componente chamado de *Belt-Alternator-Starter* (BAS), que funciona com três funções principais: partida e parada do veículo, freio regenerativo e assistente de torque. Essas funções auxiliam os VE com relação ao consumo de combustível, tornando-os mais econômicos.

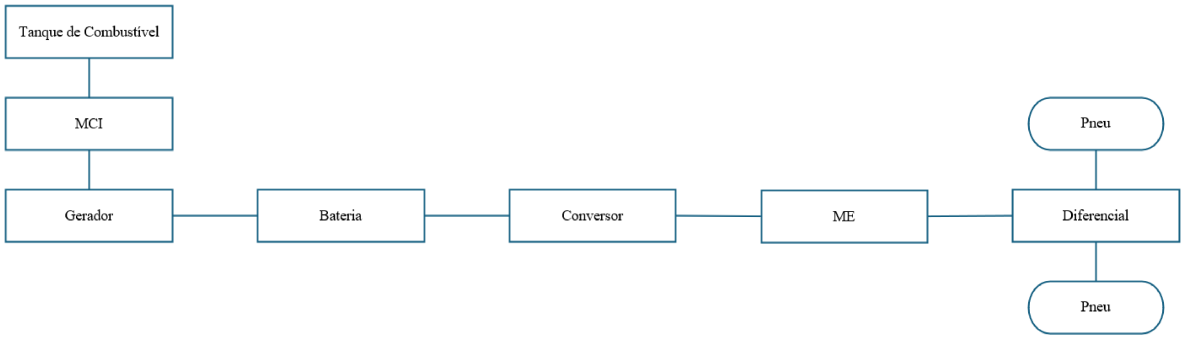


Figura 5 – Esquema de um REEV.
Fonte: Adaptado de Wahono *et al.* (2016).

3.4 Etanol

3.4.1 Breve Histórico

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (BRASIL, 2020), o Brasil tem um longo histórico de utilização do etanol como combustível, com os primeiros registros de seu uso, partindo de década de 1910. A partir da década de 1970, devido às duas grandes crises do petróleo, iniciou-se no país a busca por combustíveis alternativos. O etanol emergiu como uma possibilidade viável, devido ao seu número de octano superior em comparação com a gasolina, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Nº de Octano e de Cetano para os principais combustíveis.

Combustível	Gasolina	Etanol (E100)	Diesel Nº2	Biodiesel
Nº de Octano	81 - 90	108	-	-
	90 - 100	92	-	-
Nº de Cetano	5 - 20	-	40 - 55	60

Fonte: Adaptado de Heywood (2018).

Através do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), criado em novembro de 1975, buscou-se realizar o desenvolvimento das técnicas e aperfeiçoamento dos insumos para a produção de álcool etílico. Durante a sua primeira etapa, que foi de 1975 até 1979, os esforços se concentraram na produção de álcool etílico anidro, com o intuito de adiciona-lo à gasolina. A partir da década de 1980, como forma de consolidar o programa, foram concedidos incentivos para a compra de veículos que utilizassem o etanol como combustível. Em paralelo com esse incentivo, passou-se a adotar uma porcentagem de etanol que deveria ser adicionado a composição da gasolina comercializada em todo o país, estando fixada em 27,5 % de etanol anidro na composição da gasolina (BRUNETTI, 2018).

3.4.2 Características e Regulamentação

Segundo a definição a ANP, o etanol é um biocombustível proveniente da fermentação de açúcares, pode-se salientar que o etanol produzido no Brasil tem sua origem na cana-de-açúcar. Existem duas formas de utilização desse produto, o etanol anidro e o hidratado, o primeiro é adicionado à gasolina e o segundo é utilizado como único combustível, tanto em veículos a álcool e como em veículos *flex* (BRASIL, 2020).

A regulamentação da qualidade desse combustível é feita pela ANP, na Tabela 4 são definidas as porcentagens mínimas de etanol e os teores máximos de água:

Tabela 4 – Parâmetros para qualidade dos diferentes tipos de etanol.

Característica	Unidade	Limite		
		EAC	EHC	EHCP
Teor de etanol, mín.	% volume	98,0	94,5	96,3
Teor de água, máx.	% massa	0,7	7,5	4,5

Fonte: Adaptado de Brasil (2022b)

Legenda:

- EAC - Etanol Anidro Combustível;
- EHC - Etanol Hidratado Combustível;
- EHCP - Etanol Hidratado Combustível *Premium*.

3.5 Emissões

Nesse tópico serão abordados os principais poluentes produzidos por MCI e as regulamentações no Brasil, para buscar a redução nas emissões.

3.5.1 NO_x

Apesar de quando abordado o tema do NO_x, serem incluídos o óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO_2, o primeiro acaba sendo o principal produto da formação de NO_x dentro do cilindro, no MCI. A principal fonte de NO é a oxidação do nitrogênio atmosférico. Em condições de combustão quase estequiométricas, em misturas de ar-combustível, as principais reações para a formação de NO são (HEYWOOD, 2018):

$$N_2 + O \longrightarrow NO + N$$

$$N + O_2 \longrightarrow NO + O$$

$$N + OH \longrightarrow NO + H$$

De acordo com Mandalho (2013), o NO_2 é um gás poluente que possui uma grande capacidade de ser oxidante. Altas concentrações desse gás podem levar ao aumento de internações hospitalares, devido aos problemas respiratórios causados e agravamento de condições preexistentes em pessoas alérgicas, já com relação ao meio ambiente, pode levar à formação de chuvas ácidas e *smog* fotoquímico.

Nos MCI de IF o tempo de ignição contribui de maneira significativa na formação de NO_x, antecipando o tempo de ignição durante o ciclo de combustão, causa um aumento considerável na pressão interna do cilindro, esse fenômeno contribui para a formação desse poluente, quando comparado com a alternativa de atrasar a ignição. Na Figura 6 são mostradas as concentrações dos poluentes mais importantes presentes no escape de um MCI de IF.

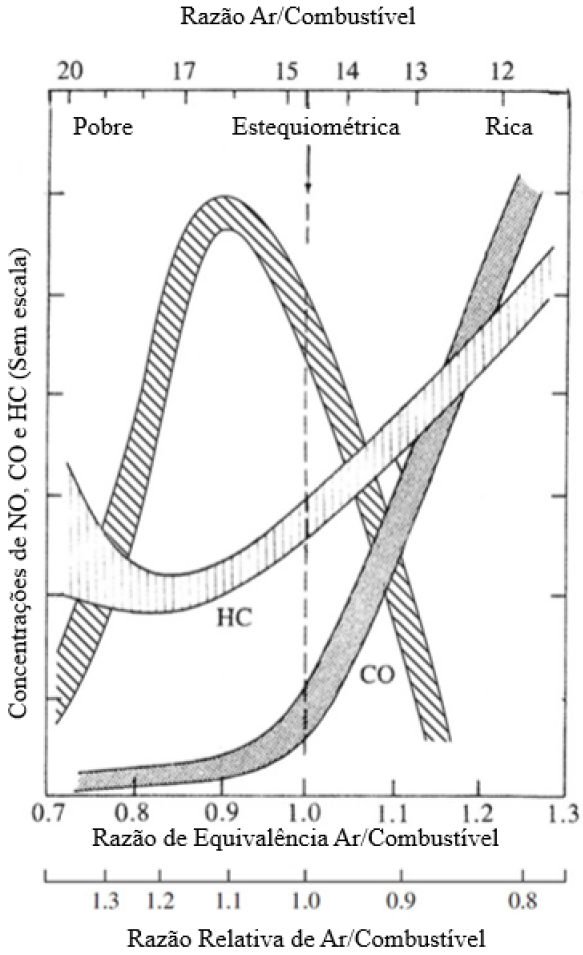


Figura 6 – Variação de NO, HC e CO no escape de um MCI de IF.
Fonte: Adaptado de Heywood (2018).

3.5.2 Material Particulado (MP)

De acordo com Mandalho (2013) o MP é uma mistura complexa de sólidos com o tamanho bastante reduzido, sua classificação é feita pelo diâmetro das suas partículas, por conta da relação existente entre o diâmetro e a possibilidade de penetração no trato respiratório. Entre seus efeitos documentados em estudos, estão o câncer respiratório, arteriosclerose, inflamações no sistema respiratório, agravamento de condições pre-existentes e em excesso pode levar a óbito.

3.5.3 Hidrocarbonetos (HC)

De acordo com Heywood (2018), são a consequência da combustão incompleta de um combustível baseado em carbono. Normalmente essas emissões equivalem entre 1% e 2% do combustível injetado no MCI. A emissão de HC é de extrema importância para medir a ineficiência da combustão, mas não é necessariamente recomendada para uma análise da emissão de poluentes. Isto se deve ao fato de que vários tipos de HC são emitidos no escapamento do MCI. A Tabela 5 segmenta por classe essas emissões em MCI de IF. As suas emissões aumentam de forma significativa quando as misturas de ar-combustível ficam mais ricas do que o estequiométrico.

Tabela 5 – Emissões de HC em motores de Ignição por Faísca (IF).

	Carbono, percentual do total de HC			
	Parafinas	Olefinas	Acetileno	Aromáticos
Emissões saída MCI	33	27	8	32
Emissões saída Catalisador	57	15	2	26

Fonte: Adaptado de Heywood (2018).

Segundo Brunetti (2012) as emissões de HC, formam-se junto as paredes da câmara de combustão, onde a temperatura não é alta o suficiente para completar a reação de combustão, ou em regiões onde a mistura é excessivamente rica ou pobre. Alguns deles são considerados carcinogênicos e também são responsáveis pelo *smog*. Os HC não são tão presentes em MCI de IC à Diesel, já que esses operam em regimes com excesso de ar.

3.5.4 Regulamentação

De acordo com Martins (2006) os MCI são os principais causadores da poluição nas cidades. Existem 3 modos em que eles podem contribuir para a emissão de poluentes na atmosfera, são elas:

- Por evaporação do combustível;
- Pelos gases de escape;
- Por emissão dos gases produzidos no motor.

Segundo Brunetti (2012) é comum que os países e comunidades possuam suas próprias regulamentações de emissões com relação aos seus respectivos limites, por exemplo, na Europa existe o conhecido programa EURO, levando em conta o que seja mais representativo para a sua realidade, seja para a certificação de novos modelos de veículos ou para a inspeção de veículos já existentes.

Com relação ao Brasil, o Ministério do Meio Ambiente (MMA), por meio do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), define as diretrizes e aplicabilidade das legislações de emissões veiculares através do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) e do Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (Promot), que definem quais referências técnicas devem ser seguidas para certificação de veículos e também dos procedimentos necessários para a realização dos ensaios. Atualmente o Proconve está na em sua sétima fase, com o L7 e P7, para veículos leves e pesados, respectivamente. A partir de 2025, está previsto o início do L8 e P8 (BRASIL, 2022a).

Na Tabela 6 são apresentados os limites de emissões para os veículos leves.

Tabela 6 – Proconve L7.

Categoria	NMOG + NOx em mg/km	MP(1) em mg/km	CO em mg/km	Aldeídos(3) em mg/km	NH3(2) em ppm	Evaporativa(5)	Emissão de abastecimento (5)
Leve Passageiro	80	6	1000	15	Declarar	0,5 g/teste	50 mg/L abastecido
Leve	140 (3)	6 (3)					
Comercial	320 (4)	20 (4)		-			-

Fonte: Adaptado de Brasil (2018).

A Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA, 2015) realizou um comparativo entre o Proconve P7 e o EURO VI, programa que regulamenta as emissões na Europa, chegando a algumas conclusões importantes entre suas semelhanças, são elas:

- Significativa redução das emissões;

- Apesar de o sistema utilizado ser mais complexo, trazendo dificuldade para a utilização de peças paralelas, a fiscalização ainda é necessária;
- Aumento do período da durabilidade de emissões;
- Ciclos mais representativos do uso real;
- Medições *on board* e com verificações durante o uso;
- Causa uma aproximação entre os mercados desenvolvidos, possibilitando a exportação.

3.6 Catalisadores

Os catalisadores são equipamentos que têm como objetivo reduzir as emissões de poluentes que saem do MCI, como o Óxidos de Nitrogênio (NO_x), CO e HC. Heywood (2018), Brunetti (2018) e Martins (2006) destacam que esses equipamentos agora são essenciais para os veículos, os seus modelos mais conhecidos são:

- Catalisadores de oxidação: Para HC e CO;
- Catalisadores de redução: Para NO_x;
- Catalisadores de três vias: Para os três.

Brunetti (2012) destaca que a melhor forma de se neutralizar grandes partes das emissões vindas do MCI é a partir de um conversor catalítico, representado na Figura **??** mais conhecido como catalisador. Nele, os gases NO_x, HC e CO são transformados em Dióxido de Carbono (CO_2), Água (H_2O) e Nitrogênio (N_2), que são menos nocivos, na Figura 7 está esquematizado o funcionamento desse equipamento. Essas reações ocorrem de forma simultânea e rápida nos catalisadores de paládio e ródio, nos MCI a gasolina, e paládio e molibdênio, nos MCI a etanol. As principais reações que ocorrem em um catalisador de três vias são:

$$4HC + 5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 2H_2O$$

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$$

$$2NO_2 + 2CO \rightarrow N_2 + 2CO_2$$

Devido ao balanço das reações, esse dispositivo só é eficiente em uma estreita faixa de emissões, provenientes de misturas próximas à estequiométrica. A Figura 8 apresenta essa faixa de operação do catalisador.

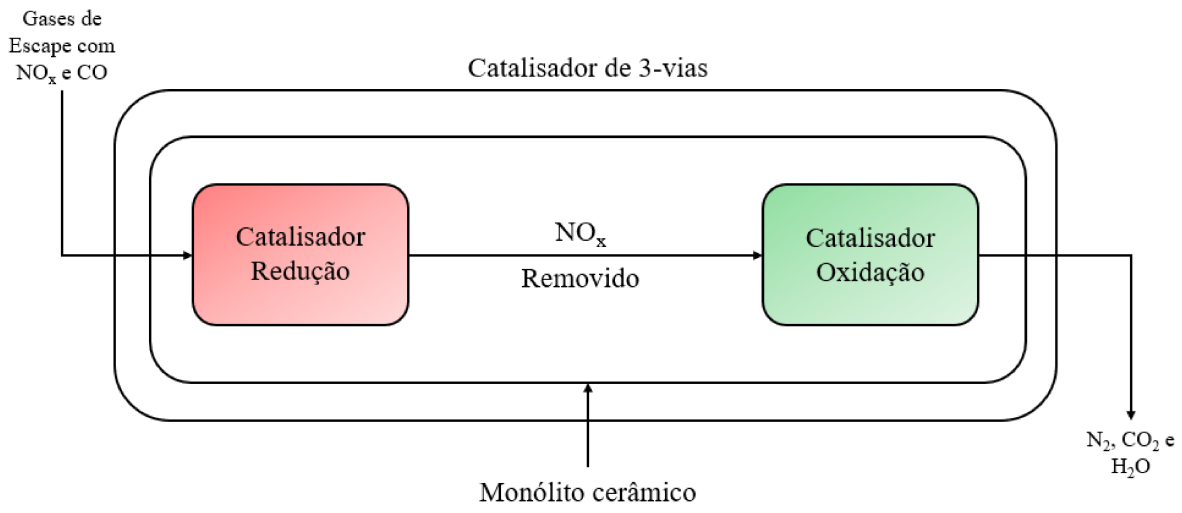


Figura 7 – Exemplo de um catalisador de três vias.
Fonte: *Hasy Environment* (2019).

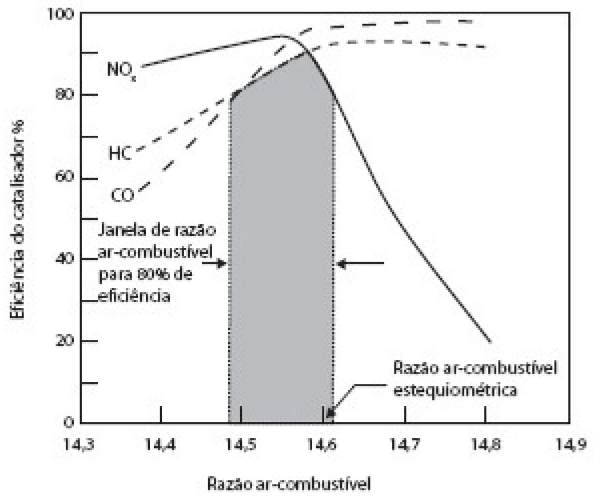


Figura 8 – Eficiência catalítica em função da razão ar-combustível.
Fonte: Adaptado de Brunetti (2012).

3.7 Ciclos de Condução

Segundo Islameka *et al.* (2023), o ciclo de direção é uma série de dados de velocidade do veículo ao longo de um certo período de tempo. De acordo com o MMA os ciclos de condução são os procedimentos utilizados para a determinação de emissões veiculares, sendo composto por um conjunto de parâmetros; são eles:

- Velocidade;
- Distância;
- Aceleração;
- Tempo de condução;
- Duração;

- Frequência de partidas;
- Paradas.

No Brasil, o ciclo de condução adotado para a certificação de veículos leves e comerciais leves é o ciclo americano conhecido como *Federal Test Procedure 75* (FTP-75). Os procedimentos necessários para a realização desse teste estão presentes na NBR 6601. Além desse ciclo, existem outros que são empregados ao redor do mundo: o Europeu (NEDC - *New European Drive Cycle*, o Japonês (JC08 - *Japan Cycle '08*) e o Americano (CAFE - *Corporate Average Fuel Economy*). É importante ressaltar que é inadequado a comparação direta dos resultados obtidos para o mesmo veículo ensaiado sob diferentes ciclos (AMBIENTE, 2024).

Existe uma diferença de finalidade para eles, com relação aos veículos equipados com um MCI ou com um ME, o teste é realizado para medir a performance e as emissões, enquanto que no segundo, a intenção é analisar a quantidade de energia consumida. Normalmente, esse ciclo é feito em um dinamômetro de rolos e um conjunto de dados com uma certa relevância são medidos, são eles:

- Força de tração;
- Calor gerado pelo motor;
- Emissões;
- *Fuel Consumption* (Consumo de combustível) (FC) (MCI);
- SOC (ME).

Qiao *et al.* (2024) destaca que na busca pela otimização dos MCI em diferentes condições, diversos estudos são realizados no campo das simulações transientes para análise da performance, balanço de energia e emissões a partir de ciclos de direção de padrão internacional, como o FTP-75, NEDC, WLTC, etc.

Em um estudo conduzido por Wang *et al.* (2021), onde foi analisado a performance de um veículo à gasolina seguindo o ciclo *Worldwide Harmonized Light duty Test Cycle* (WLTC), foi observado que a performance e balanço de energia poderiam representar as condições reais de direção.

3.7.1 FTP-75

Conforme explicado no tópico anterior, o padrão de testes de emissões de poluentes realizados no Brasil são descritos pela norma NBR 6601. Essa norma adota o mesmo teste padrão para veículos leves americanos, o FTP-75 (ABNT, 2005).

Esse teste consiste em 3 fases distintas, são elas, a primeira fase consiste possui uma duração de 1372 s para ser realizada, cobrindo uma distância de 12,1 km a uma velocidade média de 31,46 km/h e é dividida em duas partes. Com os 505 s iniciais ,que cobrem 5,78 km, é onde se encontra a fase transitória de partida a frio, após esse início chegamos fase estabilizada que dura 867 s cobrindo 6,32 km a uma velocidade média de 22,55 km/h. Com o fim da primeira fase, o veículo fica parado por 10 minutos com o seu motor desligado e de capô aberto, esse sendo fechado antes do início da última fase. A fase transitória quente, terceira fase, é uma repetição com ciclo inicial, repetindo os mesmos 505 s (MURTA, 2008). A Figura 9 representa graficamente o ciclo FTP-75 e suas fases.

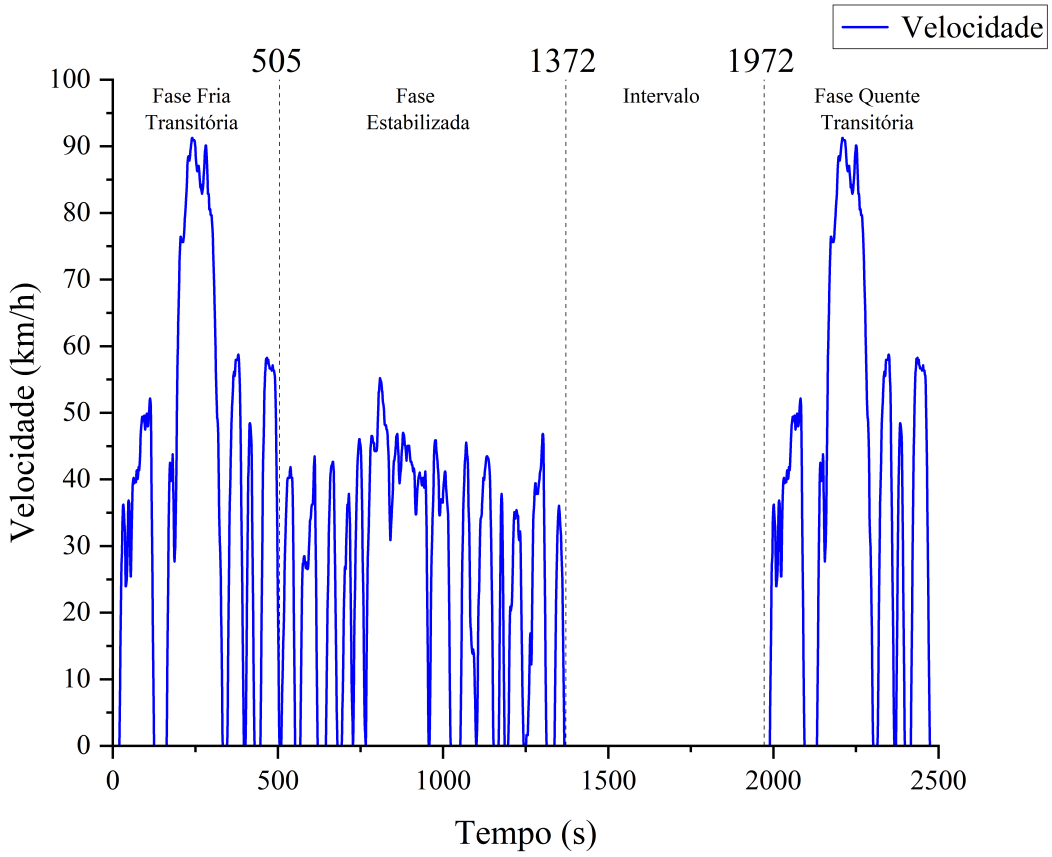


Figura 9 – Ciclo de Condução FTP75
Fonte: Adaptado de AGENCY (2015).

Outras informações relevantes acerca desse teste são apresentadas a seguir:

- Duração: 2477 segundos;
- Distância: 17,77 km;
- Velocidade média: 34,1 km/h.

3.7.2 Dinamômetro de Chassi

Conforme observado na seção anterior, o uso desse equipamento é de extrema importância para a análise do comportamento veicular e para certificação de suas emissões. As Figuras 10 e 11 mostram exemplos desse tipo de equipamento. De acordo com Martyr e Plint (2012) a sua utilização não se limita apenas a validação das emissões, mas também para a otimização da performance do veículo com um todo. Essa direção em condições controladas permite testar uma série de componentes:

- Operação do sistema em situações de carga;
- Barulho e vibração;
- Dirigibilidade em condições transientes e performance de freio;
- Performance em condições climáticas extremas;
- Imunidade eletromagnética;
- Performance em túnel de vento;
- Teste de potência e do sistema de resfriamento.

A grande vantagem de utilizar esse equipamento é que ele permite a observação completa do desempenho do veículo, enquanto ele opera com potência total e, guardadas as devidas proporções, em movimento. É um requisito fundamental que ele tenha que resistir ao torque produzido pelas rodas do veículo, de maneira similar a resistência do veículo ao movimento. Para simular a performance real, a Equação 3.1 define a força de tração ou a força de frenagem em todas as condições de direção em linha reta, que incluem (MARTYR; PLINT, 2012):

$$F = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + MdV/dt + Mgsin\theta \tag{3.1}$$

- Manter uma velocidade constante e desacelerar em uma estrada plana;
- Subir e descer colinas;
- Acelerar, desacelerar e frear;
- Transições entre essas situações;
- Considerações sobre resistência do ar, carga, carga rebocada, pressão dos pneus, etc.

Figura 10 – Dinamômetro de Chassi
Fonte: Martyr e Plint (2012).

3.8 Simulação 1D

Segundo Schiehlen (1993), a grande competição entre as industrias automotivas tem como consequência a necessidade de desenvolver automóveis em períodos cada vez mais curtos. Enquanto o *modus-operandi* dessas fabricantes durante os anos 50, 60 e 70 era de aperfeiçoar e desenvolver o veículo a partir de testes experimentais que se tornaram inviáveis financeiramente ao longo do tempo. A ideia que é adotada atualmente por grande parte dessas empresas, é utilizar ferramentas de simulação e de desenho para realizar todo o desenvolvimento do veículo. Esse método é chamado de Engenharia Simultânea (ES), que é definida pelo design e validação do produto, o seu processo de fabricação e o seu controle de qualidade, todos eles ocorrendo de forma simultânea.

Wahono *et al.* (2016) destaca que um simulador de veículos é uma ferramenta poderosa para estimar as performances de todos os veículos, incluindo os veículos híbridos, sem a necessidade de construir um modelo físico. Ele permite o usuário construir um modelo com todos os componentes necessários sem grandes custos e com resultados rápidos. Alguns desses

Figura 11 – Exemplo de uma instalação de testes de veículos utilizando um dinamômetro de chassi.

Fonte: Martyr e Plint (2012).

softwares de simulação para veículos se destacam no mercado, como o *AVL-Cruise*, o *GT-Suite*, o *MATLAB-Simulink* e o *Realis IGNITE*.

A Figura 12 representa um modelo de um veículo REEV no *AVL-Cruise*.

A Figura 13 representa um modelo de um veículo *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) no *Realis IGNITE*.

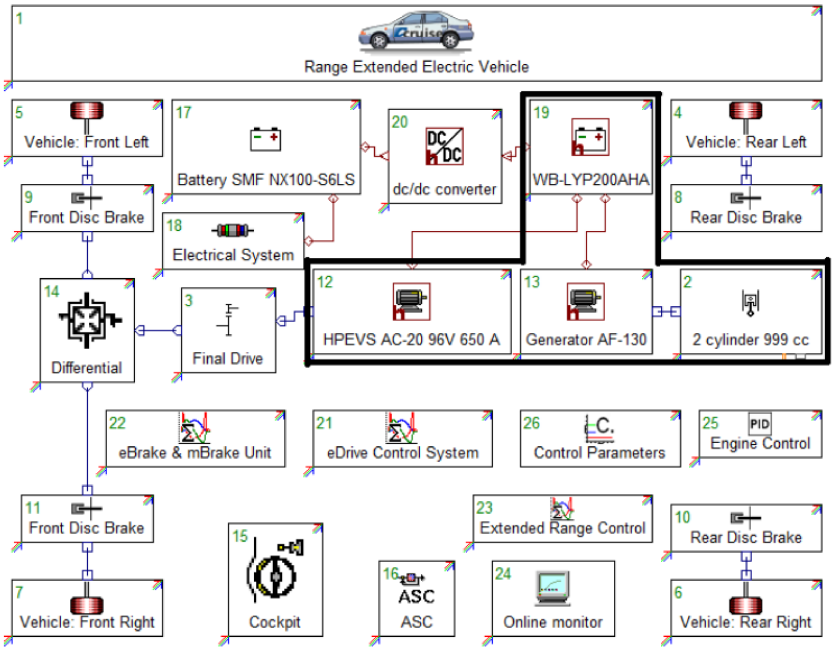


Figura 12 – Modelo de um REEV no *AVL-Cruise*.
Fonte: Adaptado de Wahono *et al.* (2016).

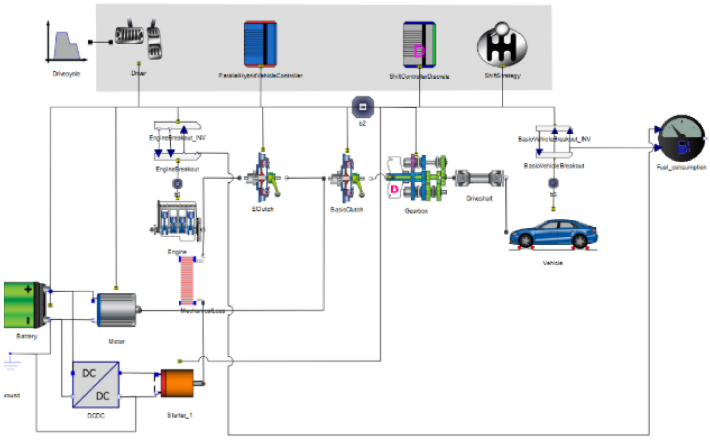


Figura 13 – Modelo de um PHEV no *Realis IGNITE*.
Fonte: Adaptado de Realis (2024).

4 METODOLOGIA

O presente capítulo descreve os procedimentos utilizados para o desenvolvimento de um modelo de veículo do tipo REEV utilizando um MCI do tipo HCCI à Etanol. A escolha dos procedimentos metodológicos foi embasada na necessidade de uma simulação precisa do comportamento do sistema de propulsão e da autonomia estendida. A pesquisa é de caráter quantitativo, baseada na simulação computacional, buscando uma modelagem precisa do veículo. A escolha por essa abordagem se deu pela possibilidade de uma análise minuciosa de seu desempenho energético, de suas emissões e de sua autonomia em diferentes cenários de operação.

Neste capítulo, também será apresentado o passo a passo de todo o processo de modelagem do veículo, começando pelas informações do veículo, passando pela sua modelagem em *software* de simulação 1D, coleta de dados, simulação e cenários de teste, e, por fim, a sua validação.

4.1 Informações do Veículo

O veículo escolhido foi um Sandero 1.0. Essa escolha foi feita pela fabricante que patrocina esse projeto. Com relação ao MCI, o motor desse veículo é o BR10, suas informações estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Informações BR10.

Informações BR10		
Descrição	Valor	Unidade
Cilindradas	999	cm^3
Taxa de Compressão (TC)	12:1	-
Nº de Cilindros	3	-
Diâmetro do Cilindro	71	mm
Curso do Pistão	84,1	mm
Potência Máxima	82	cv
Combustível	Gasolina Etanol	-

Fonte: Adaptado de Renault (2023).

Ao longo do presente trabalho, esse MCI será analisado de forma minuciosa, com o objetivo de fazer o seu mapeamento com relação ao:

- Torque;
- Consumo específico de combustível;

- NO_x;
- CO;
- HC.

A obtenção desses mapas foi realizada em ensaios de bancada dinamométrica com o MCI operando regime permanente. A execução desses ensaios permitiu um conhecimento aprofundado acerca do funcionamento desse MCI, garantindo assim que a modelagem numérica do veículo de forma confiável no *software Realis IGNITE*.

Um outro ponto importante desse trabalho, são os estudos acerca das LTC com esse MCI, que é o HCCI. Onde foram feitas comparações a partir da realização de ciclos de direção semelhantes para uma análise minuciosa das emissões de poluentes e do consumo de combustível ao longo do ciclo, com o objetivo de propor possíveis melhorias ao método de combustão, alinhando esse MCI a normas de emissões de poluentes cada vez mais rigorosas.

As Tabelas 8, 9 e 10 fornecem os dados aerodinâmicos, as dimensões e a relação de marchas do veículo, respectivamente.

Tabela 8 – Informações Aerodinâmicas.

Informações Aerodinâmicas		
Descrição	Valor	Unidade
Diferencial	4,93:1	-
Coeficiente de Arrasto (Cx)	0,3	-
Torque Máximo @ 3500RPM	10,5	kgfm
Área Frontal (A)	2,26	m^2
Área Frontal Corrigida	0,678	m^2

Fonte: Adaptado de Renault (2023).

Tabela 9 – Dimensões.

Dimensões		
Descrição	Valor	Unidade
Comprimento	4070	mm
Distância Entre-Eixos	2590	mm
Altura Mínima Solo	140	mm
Largura	1733	mm
Altura	1536	mm
Peso	1035	kg
Carga Útil	447	kg

Fonte: Adaptado de Renault (2023).

Essas informações são de extrema importância para a criação do modelo desse veículo no *software* de simulação de dinâmica veicular. Com elas, será possível criar o modelo

Tabela 10 – Relação de Marchas.

Marchas	
Descrição	Relação
1º	4,09:1
2º	2,24:1
3º	1,39:1
4º	1,03:1
5º	0,82:1
Ré	3,55:1

Fonte: Adaptado de Renault (2023).

mais próximo do real.

4.2 Obtenção de dados

Conforme citado na seção anterior, os dados do MCI BR10 foram obtidos através de ensaios em bancada dinamométrica. Esses ensaios são de grande importância para estudos como esse, já que permitem que sejam analisados diferentes ciclos de direção, onde, ao final deles, temos uma série de dados obtidos para analisar.

Estando encerrada essa etapa de ensaios em bancada dinamométrica, realizou-se um ensaio do veículo Sandero 1.0 em um dinamômetro de rolos, seguindo o ciclo de direção FTP-75. Esse ensaio é de grande importância para analisar o comportamento dinâmico do veículo e, além disso, é onde são analisadas as emissões após o tratamento dos poluentes pelo catalisador do veículo. Os dados dos ensaios realizados no dinamômetro de rolos foram disponibilizados para serem utilizados como validação para as simulações a serem realizadas no *software Realis IGNITE*, a partir de uma licença acadêmica do Laboratório de Hidrogênio Verde e Máquinas Térmicas (LHMT).

4.3 Implementação do modo HCCI

Com relação aos estudos realizados acerca do modo de combustão HCCI, foi utilizado um MCI em configuração específica, para servir de plataforma de testes para novos métodos de combustão avançada.

No teste em bancada dinamométrica utilizando esse MCI, um dos seus seis cilindros foi adaptado para operar em regime HCCI, enquanto os restantes continuaram a sua operação em regime de IC. A escolha por essa abordagem foi devido a uma das deficiências do HCCI, que é a de partida a frio, então os 5 cilindros restantes operaram de forma convencional para fornecer o

calor necessário para o sexto cilindro. Para implementar essa tecnologia em motores utilizados em testes de ciclos de direção, é crucial contar com um sistema de controle eletrônico avançado. Esse sistema deve gerenciar as flutuações de ignição durante os ciclos de combustão de forma estável e segura.

Para avaliar o comportamento do motor tanto no modo convencional quanto no modo HCCI, foram traçadas curvas de desempenho e emissões para ambos os regimes operacionais. Essas curvas permitirão uma comparação detalhada entre os dois modos, especialmente em termos de eficiência energética e emissões de poluentes, como CO, NO_x e HC. As diferenças observadas nas curvas de desempenho e emissões entre os modos convencional e HCCI serão aplicadas ao motor BR10, com o objetivo de prever seu comportamento em cenários futuros quando configurado para operar com a tecnologia HCCI.

A combinação entre o HCCI e o BR10 possui um bom potencial para ganhos significativos quando analisados os campos de emissões de poluentes e de economia de combustível, podendo ser um grande passo para o desenvolvimento de MCI mais econômicos e menos nocivos ao meio-ambiente.

4.4 Modelagem do REEV

O passo seguinte à análise do método de combustão convencional e do HCCI é a eletrificação do veículo através do método *Range extender*, onde o MCI passa a ser um auxiliar no conjunto de potência, atuando apenas em certos momentos para acionar o gerador elétrico que, por sua vez, alimentará a bateria do veículo. A escolha por esse método em específico é pela possibilidade de manter a mesma potência do veículo, reduzindo consideravelmente as emissões e o consumo de combustível.

A modelagem do veículo foi realizada no *software Realis IGNITE*, que permitiu a criação de um modelo fiel às condições em que os testes experimentais foram realizados. A Figura 4 apresenta um esquema simplificado do REEV, onde é possível observar que o MCI agora tem o papel de alimentar o gerador e a bateria, que passam a alimentar o motor elétrico.

O *Realis IGNITE* é uma ferramenta de simulação baseada em física voltada para a modelagem e simulação de sistemas completos de veículos. Com uma vasta gama de "blocos de construção"multidomínios, os usuários podem modelar de forma rápida e precisa diferentes tipos de arquiteturas veiculares, desde veículos convencionais até híbridos e totalmente elétricos. Com uma execução mais rápida que o tempo real, isto é, ao invés de levar cerca de 2477 segundos para

serem obtidos os resultados experimentais de um ciclo de condução, essa ferramenta permite que o mesmo ciclo seja executado em 1/10 do tempo total do ciclo, e controle de simulação simplificado, essa ferramenta permite uma análise rápida do desempenho do veículo, economia de combustível e emissões de pós-tratamento, desde a concepção até a verificação detalhada do design (REALIS, 2024).

Os dados obtidos acerca do funcionamento do veículo à etanol foram obtidos através de teste em bancada dinamométrica de rolos, ou de chassi. O *software* possui um bloco que simula um veículo nesse tipo de dinamômetro. Os dados de entrada são

Na Figura 14 , é o modelo criado dentro do *software*. É possível observar os componentes básicos como o chassi, bateria, gerador e os motores elétrico e à combustão. No lado direito da figura estão localizados os blocos matemáticos e booleanos que são responsáveis pelo controle do REEV já que o *software* não possui um bloco específico para essa atividade. Alguns dos parâmetros precisaram ser alterados em comparação com o que consta na ficha técnica do veículo, são eles (Renault Europe, 2024):

- Peso do veículo: Nesse caso temos a adição de um ME, de um GE e de um banco de baterias, fazendo com que houvesse uma adição no peso total, adicionando um valor de 160kg ao total do convencional;
- ME e GE: Para a eletrificação foram escolhidos os componentes presentes em um veículo da mesma fabricante, disponível em uma configuração híbrida. Então a potência do ME no modelo computacional foi fixada em 36kW fornecendo um torque máximo de 205N.m;
- Bateria: Os dados também foram obtidos a partir da configuração do veículo citado no tópico anterior. A bateria do modelo ficou fixada em um conjunto de 68 células em paralelo, com uma tensão total de 230V e uma capacidade de 1,2kWh;
- Transmissão: Como o veículo opera em apenas uma faixa de velocidade constante, não há a necessidade da adição de uma caixa de marchas ao modelo, por isso a mesma não está presente no modelo;

Nas subseções seguintes serão apresentados os blocos importantes que compõem a montagem do modelo *software*, junto com suas entradas de dados.

4.4.1 Bloco do MCI

Na Figura 15 é apresentado o bloco referente ao MCI no *Realis Ignite*, batizado de *BasicEngine*; esse bloco simula um MCI. Com relação aos seus dados de entrada, podemos citar

como importantes a velocidade inicial em RPM, a sua inércia, seu torque de fricção, a velocidade máxima e os mapas de torque e principais poluentes.

A escolha dos valores de entrada desse bloco foi baseada nas especificações do MCI BR10. Na Tabela 11 estão apresentados os principais dados de entrada.

Tabela 11 – Dados de entrada do MCI.

Dados de Entrada - MCI		
Descrição	Valor	Unidade
Initial Engine Speed	0	RPM
Inertia	0,12	kg/m^2
Engine Off Friction Torque	15	N.m
Overspeed RPM	6000	RPM
Overspeed Tol	50	RPM

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Além desses valores iniciais, também é necessário fornecer os mapas de torque, FC e das principais emissões, como CO, HC, NO_x e CO_2. Esses mapas foram obtidos através de testes realizados em bancada dinamométrica e pela simulação no *software* KIVA 3VR2; eles serão apresentados de forma mais detalhada no capítulo de Resultados e Discussões.

4.4.2 Bloco do veículo

O bloco batizado de *Road Load Vehicle* simula um veículo funcionando em um dinamômetro de rolos. Conforme visto anteriormente, para testes de emissões, é recomendada a utilização desse tipo de dinamômetro. A Figura 16 apresenta esse bloco e os seus dados de entrada, que são as informações mais gerais do veículo e sobre o dinamômetro. Na Tabela são detalhados os valores de entrada para esse bloco, que foram baseados no veículo Renault Sandero.

Tabela 12 – Dados de entrada do veículo.

Dados de Entrada - Veículo		
Descrição	Valor	Unidade
Mass	1260	kg
Wheel Radius	0,31075	m
Final Drive Ratio	4,93:1	-
Maximum Brake Force	1000	N

Fonte: Adaptado de Renault (2023).

4.5 Controle

Diferentemente do veículo convencional, o *software* não possui um bloco específico responsável pelo controle do REEV. Para esse caso, foram adotadas uma série de blocos booleanos presentes para a criação de um controlador próprio, conforme visto nas Figuras 17 e 18, onde estão a parte de gerenciamento da bateria e do ME e GE, respectivamente.

Com base no estudo realizado por Wang *et al.* (2022c), o SOC definido para que o MCI entrasse em funcionamento para recarga da bateria foi de 40%. A partir desse momento, o MCI passa a operar em uma velocidade constante em RPM até que a carga da bateria atingisse o valor de 90%.

As simulações de validação, tanto com o modelo experimental quanto com o REEV, foram realizadas utilizando o ciclo de condução FTP75 repetido por 6 vezes. Essa escolha se deu devido a testes iniciais de apenas um ciclo que não geraram resultados satisfatórios, já que não havia tempo para a bateria descarregar o bastante para o acionamento do MCI. Após alguns testes, ficou definida a repetição em 6 vezes, totalizando:

- Duração: 15.000 segundos;
- Distância percorrida: 106,62km;

4.6 Modelagem do catalisador

Na presente seção, será apresentado todo o processo para modelagem do catalisador de três vias do veículo em um programa escrito na linguagem *python*. A escolha por essa modelagem externa ao *software Realis IGNITE* se deu à falta de um bloco do catalisador nele.

A construção da equação diferencial para calcular a temperatura do catalisador foi realizada de forma sistemática, baseada nos princípios de conservação de energia. Inicialmente, formulou-se a equação da energia, levando em conta o equilíbrio entre o calor produzido pelas reações de oxidação no catalisador, o calor absorvido pelos gases de escape e o calor dissipado para o ambiente. A Equação 4.1 descreve a variação da temperatura do catalisador ao longo do tempo, sendo qualificada como uma equação de primeira ordem. Já a Equação 4.2 discretiza os termos de oxidação que estão presentes na Equação 4.1.

$$m_{cat} \cdot c_{cat} \cdot \frac{dT}{dt} = h \cdot A_{interna} \cdot (T_{ex} - T_{cat}) + ox - h_{ar} \cdot A_{externa} \cdot (T_{cat} - T_{amb}) \tag{4.1}$$

$$ox = \Delta\dot{m}_{CO} \cdot PCI_{CO} + \Delta\dot{m}_{HC} \cdot PCI_{HC} \tag{4.2}$$

A temperatura do catalisador foi calculada usando o método de Euler para resolver a equação diferencial correspondente. A equação da temperatura foi desenvolvida de maneira incremental, começando com uma formulação simples e sendo gradualmente refinada à medida que novas necessidades e características do sistema surgiam. A Equação 4.3 demonstra a Equação 4.1 discretizada com o intuito de solucioná-la pelo método de Euler.

$$T_{i+1} = T_i + \frac{dt}{m_{cat} \cdot c_{cat}} \cdot [h \cdot A_{interna} \cdot (T_{ex} - T_i) + ox - h_{ar} \cdot A_{externa} \cdot (T_i - T_{amb})] \tag{4.3}$$

Ao contrário do coeficiente de convecção associado à troca de calor entre o ar e a superfície externa do catalisador, o coeficiente de convecção entre a superfície interna e os gases de escape não possui uma definição simples, devido à variação contínua da vazão mássica dos gases que passam pelo interior do catalisador. Para resolver essa questão, foi necessário desenvolver uma equação onde o coeficiente h variava em função da massa dos gases de escape, permitindo a obtenção de valores distintos para h em cada instante do ciclo de operação. Dessa maneira, a relação expressa na Equação 4.5 decorre da Equação 4.4, o coeficiente de convecção para os gases de escape resulta em uma dependência direta do fluxo mássico.

$$\frac{h \cdot D}{k} \approx 3.66 \cdot \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \tag{4.4}$$

$$h \approx 3.66 \cdot \frac{\dot{m} \cdot k}{A_{transversal} \cdot \mu} \tag{4.5}$$

Para alinhar o modelo numérico ao modelo físico, foi realizada uma otimização utilizando a biblioteca *pymoo* do *Python*. Para essa otimização, dois parâmetros foram definidos para ajustes, conforme expressos na Equação 4.8 e na Equação 4.7. O processo de otimização foi realizado utilizando um algoritmo genético, que busca a melhor solução através da evolução das populações de indivíduos ao longo de várias gerações. A aptidão dos indivíduos gerados foi avaliada utilizando a Equação 4.8, onde o erro quadrático médio é calculado entre dois conjuntos de dados: os dados experimentais e os valores calculados por esse modelo. Este procedimento

permitiu identificar os parâmetros que mais aproximam o comportamento do modelo numérico ao comportamento observado experimentalmente.

$$\alpha_1 = \frac{A_{interna}}{m_{cat}\dot{c}_{cat} \cdot A_{transversal}} \tag{4.6}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{m_{cat}\dot{c}_{cat}} \tag{4.7}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{4.8}$$

Em relação aos parâmetros utilizados no processo de otimização, a Tabela 13 descreve detalhadamente as configurações adotadas para o algoritmo genético. Esses parâmetros incluem o número total de gerações estabelecido para a evolução da população, o tamanho inicial da população, o número de descendentes gerados em cada nova geração, bem como os limites impostos para a variação dos parâmetros a serem otimizados. Cada uma dessas configurações foi cuidadosamente definida para garantir um equilíbrio entre a exploração do espaço de soluções e a convergência para resultados que melhor representem o comportamento do sistema estudado.

Tabela 13 – Parâmetros de Otimização.

Parâmetros de Otimização	
Descrição	Valor
Número de gerações	100
Tamanho da população	20
Número de novos descendentes	10
Limite inferior do espaço solução	[$1e^{-8}$, $1e^{-5}$]
Limite superior do espaço solução	[$1e^{-5}$, $1e^{-3}$]

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

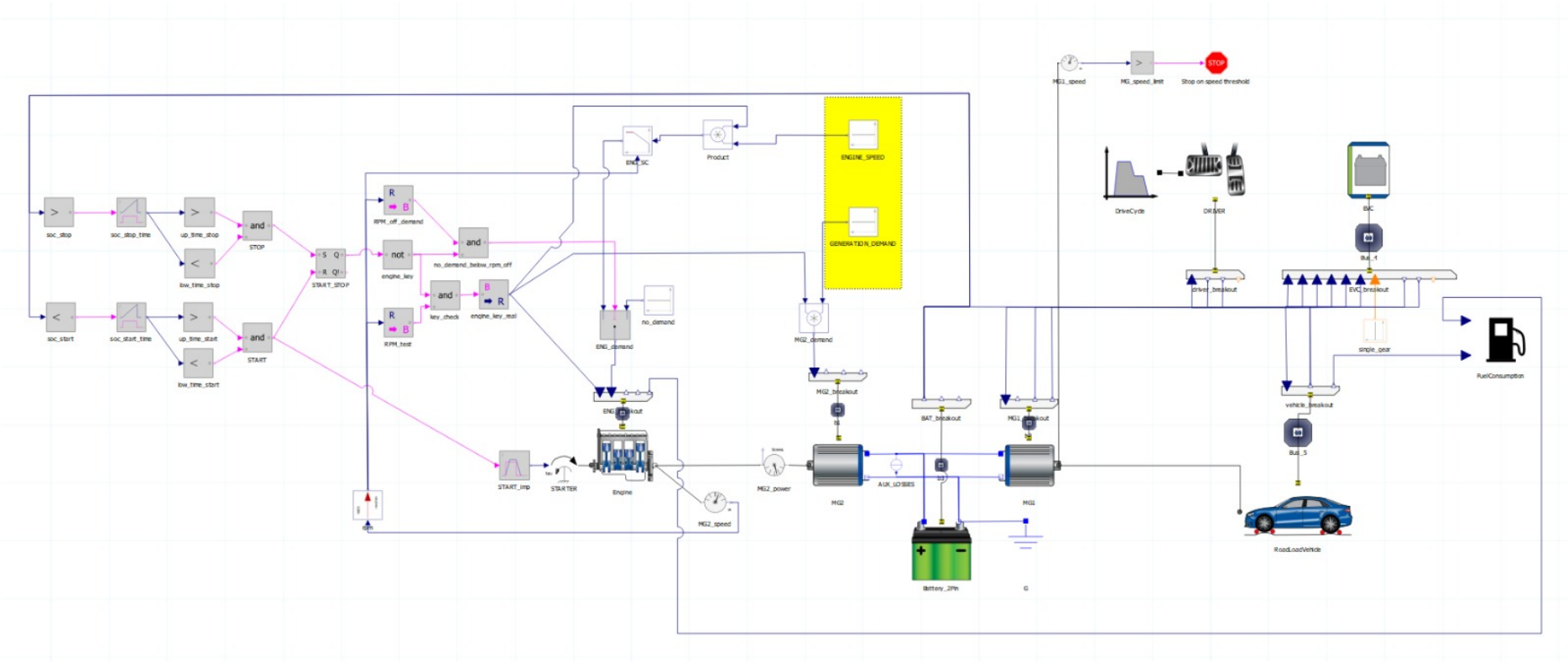


Figura 14 – Modelo do REEV no *Realis IGNITE*.
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

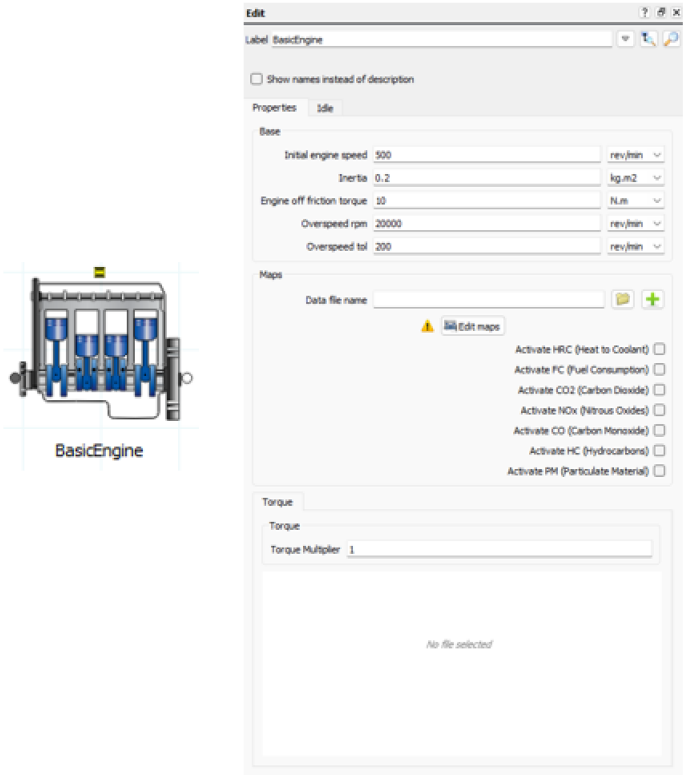


Figura 15 – Bloco do MCI.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

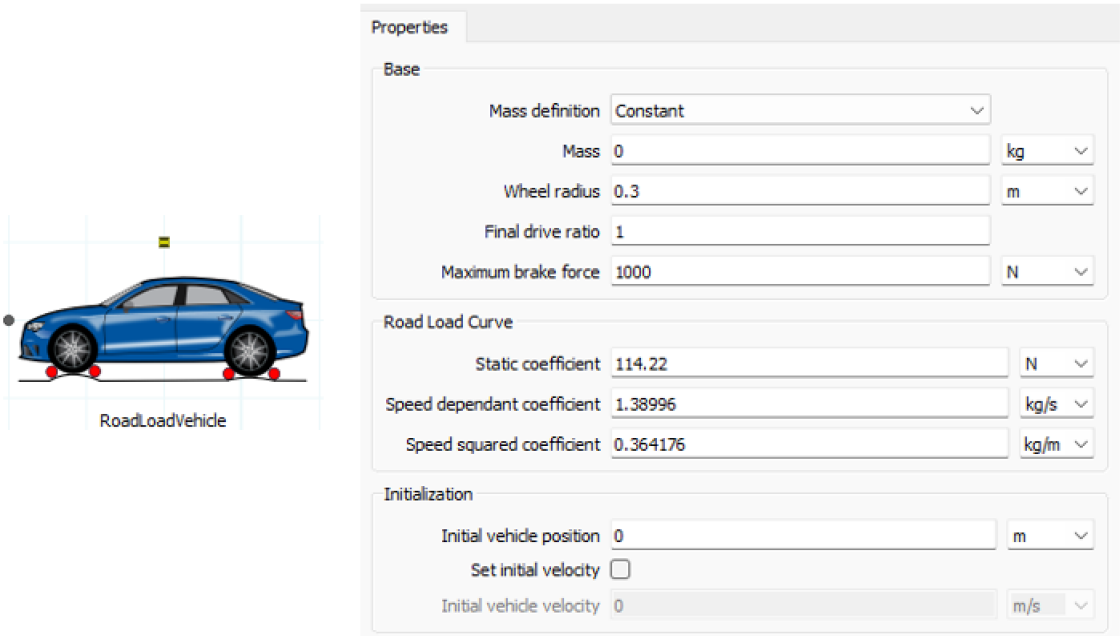


Figura 16 – Bloco do Veículo.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

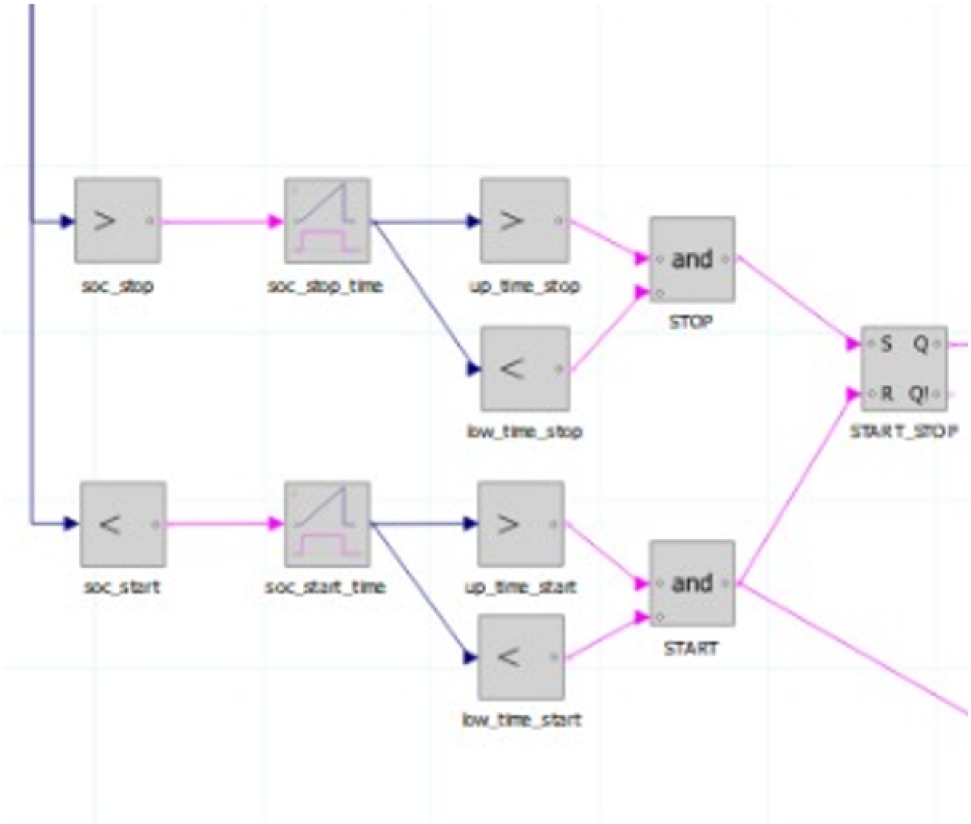


Figura 17 – Controle da Bateria.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

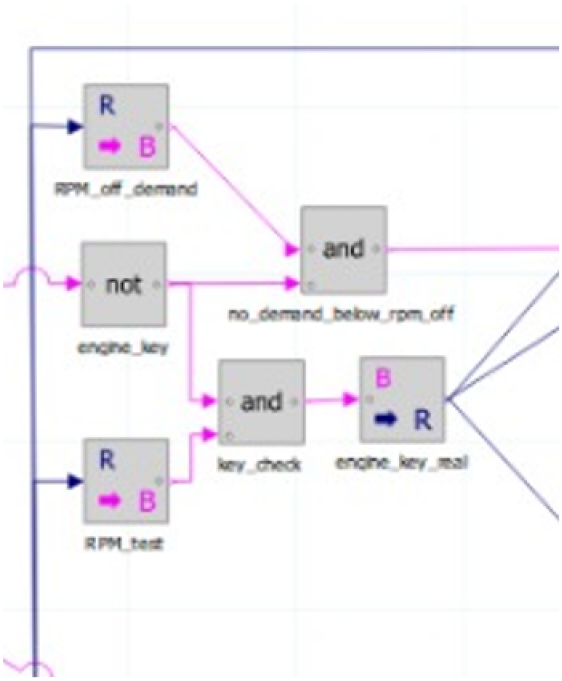


Figura 18 – Controle do ME e do GE.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo, serão apresentados os resultados obtidos nas simulações computacionais realizadas utilizando diferentes modelos de veículo e ciclos de direção. A organização foi feita da seguinte forma:

- Modelo Numérico x Modelo Experimental (Etanol);
- Modelo Etanol HCCI;
- Modelo REEV HCCI à Etanol.

5.1 Modelo Numérico x Modelo Experimental (BR10 à Etanol)

Em um primeiro momento foi criado um modelo no *software Realis IGNITE* de um veículo similar ao que foi colocado no dinamômetro de chassi seguindo o ciclo de direção FTP-75. O intuito desse primeiro teste foi comparar os valores obtidos através da simulação com os resultados obtidos nos testes experimentais realizados pela fabricante. Na Figura 19 é apresentado o modelo criado no *software*. Com relação aos dados de entrada, foram utilizados os do Renault Sandero, conforme apresentados no Capítulo 4.

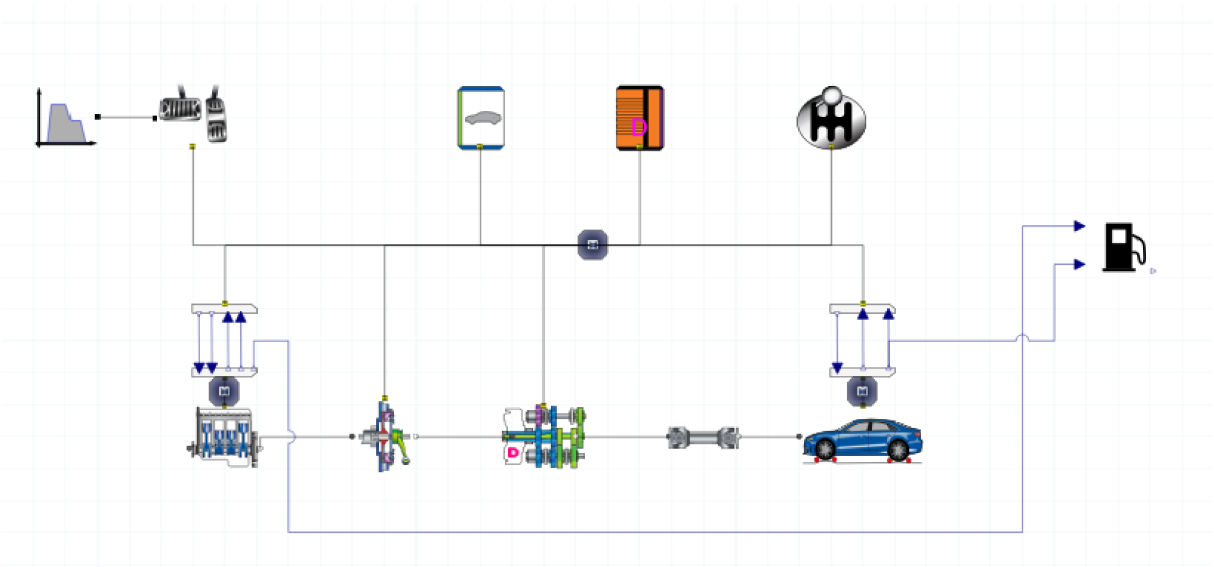
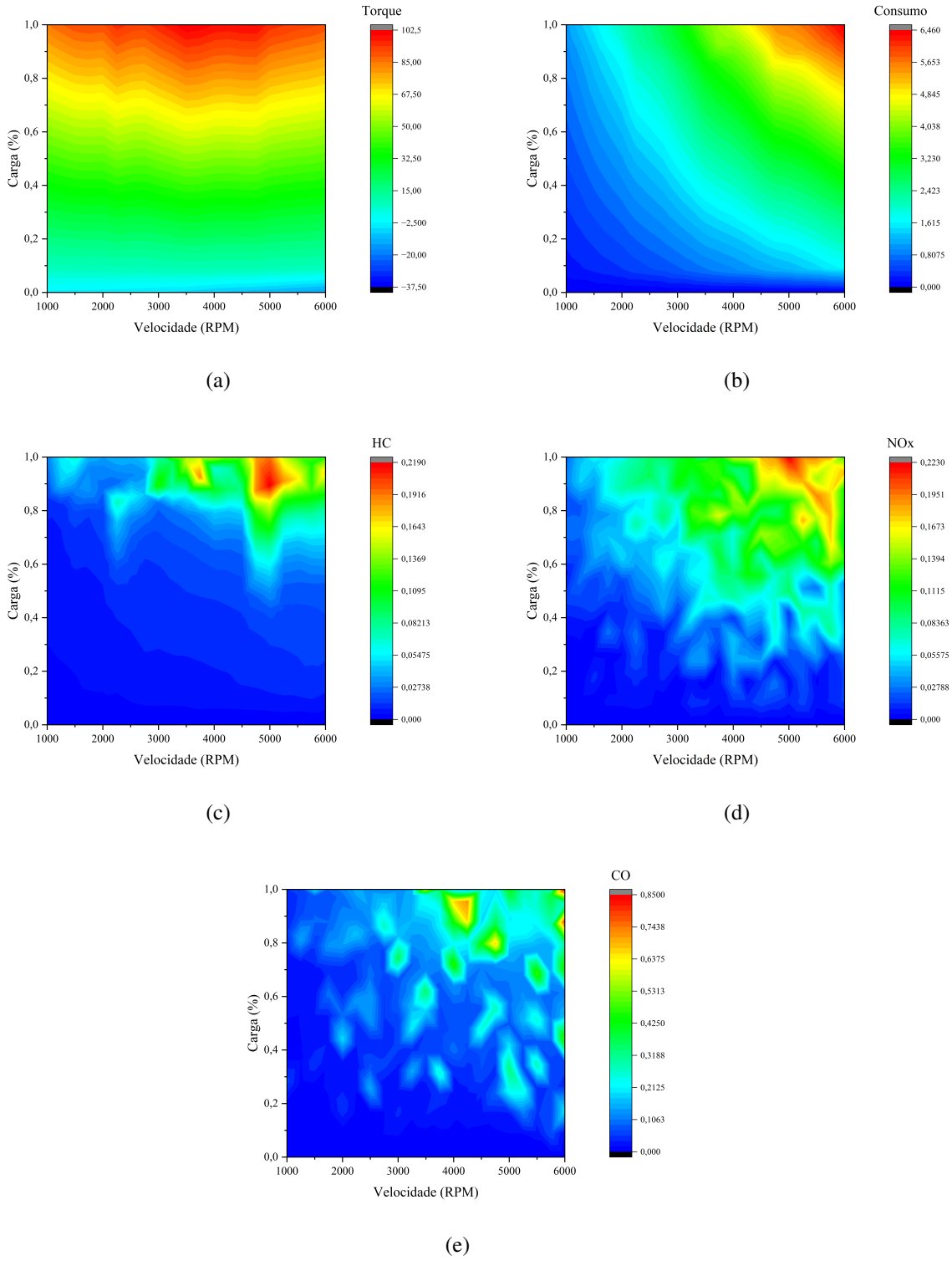


Figura 19 – Modelo *Realis IGNITE* (BR10-Etanol).
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Antes de iniciar a simulação, foi necessário fornecer uma série de informações com relação ao torque, a FC e as principais emissões, NO_x, CO, HC, são conhecidos como mapas. Esses mapas foram gerados com base em testes dinamométricos de bancada e de chassi, realizados pela fabricante em seu departamento de testes, do MCI BR10 e do veículo Sandero,

respectivamente. Na Figura 20 estão representados os mapas gerados e utilizados para essa simulação.

Figura 20 – Mapas de desempenho do BR10 à Etanol: (a) Torque, (b) Consumo, (c) HC, (d) NO_X e (e) CO.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a realização da simulação. Foram obtidos os resultados de FC e emissões para serem comparados com os do modelo experimental. Na Tabela 14 são apresentados os valores com relação ao FC, foi alcançado um erro percentual satisfatório quando comparado com o modelo experimental, de apenas 0,265%, mostrando que os mapas desenvolvidos possuem uma boa robustez para o desenvolvimento do REEV.

Tabela 14 – Consumo: Experimental x Simulação

Descrição	Consumo (km/l)	Erro (%)
Teste Experimental	11,30	-
Simulação	11,27	0,265

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

5.2 Validação do catalisador

Assim como na validação do consumo de combustível, para a validação do catalisador também foi utilizado o ciclo de direção FTP-75. Na Tabela 15 são apresentadas as constantes otimizadas, que por sua vez foram definidas a partir de uma análise realizada na curva de temperatura experimental, apresentada na Figura 21.

Tabela 15 – Parâmetros otimizados para o catalisador.

α_1	α_2	α_3
9,999999972e-5	2,87612958e-5	5,06234745e-4

Fonte: Elaborado pelo Autor(2024).

Essa otimização permitiu a melhor escolha para as constantes apresentadas na Tabela 15. Além da análise das temperaturas, também foi possível realizar o cálculo do *Root-mean-square deviation* (RMSE) para os conjuntos de dados, que oferece uma medida quantitativa da precisão que esse modelo tem perante os valores experimentais. Na Figura 22 está representada a evolução do modelo do catalisador ao longo de diferentes gerações.

Passada a etapa de otimização do catalisador, foi realizada uma co-simulação entre o *Realis IGNITE* e um *script* escrito na linguagem *Python* para ser feita a correção das emissões enquanto a simulação era executada. Para o sucesso da simulação, foram necessárias as curvas de eficiência catalítica, que variam de acordo com a temperatura no monólito. A Figura 23 apresenta as eficiências catalíticas dos poluentes, CO, NO_x e HC.

Em relação às emissões dos poluentes, conforme apresentado na Tabela 16, os valores da simulação se aproximaram bastante dos resultados experimentais. O maior erro foi observado

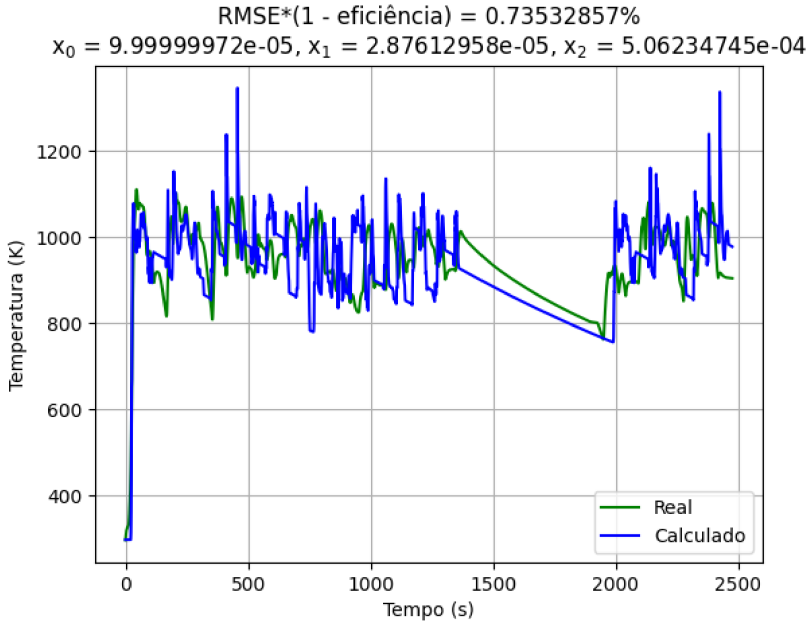


Figura 21 – Resultado da otimização do catalisador.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

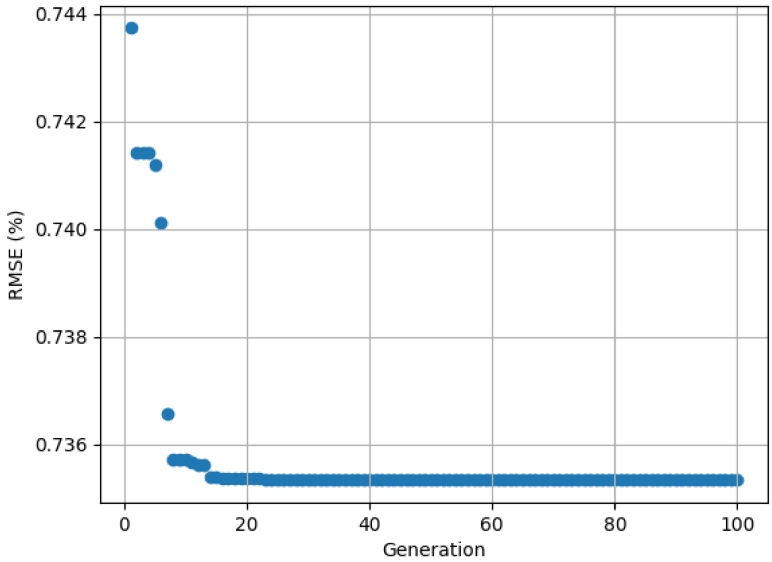


Figura 22 – Evolução do modelo computacional do catalisador ao longo gerações.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

no HC, com um valor de 2,34%. Com todos os resultados relevantes da simulação do veículo a Etanol tendo sido obtidos e com um baixo erro percentual em comparação com o experimental. Na Figura 24 também são apresentadas as emissões de poluentes já pelo catalisador de três vias.

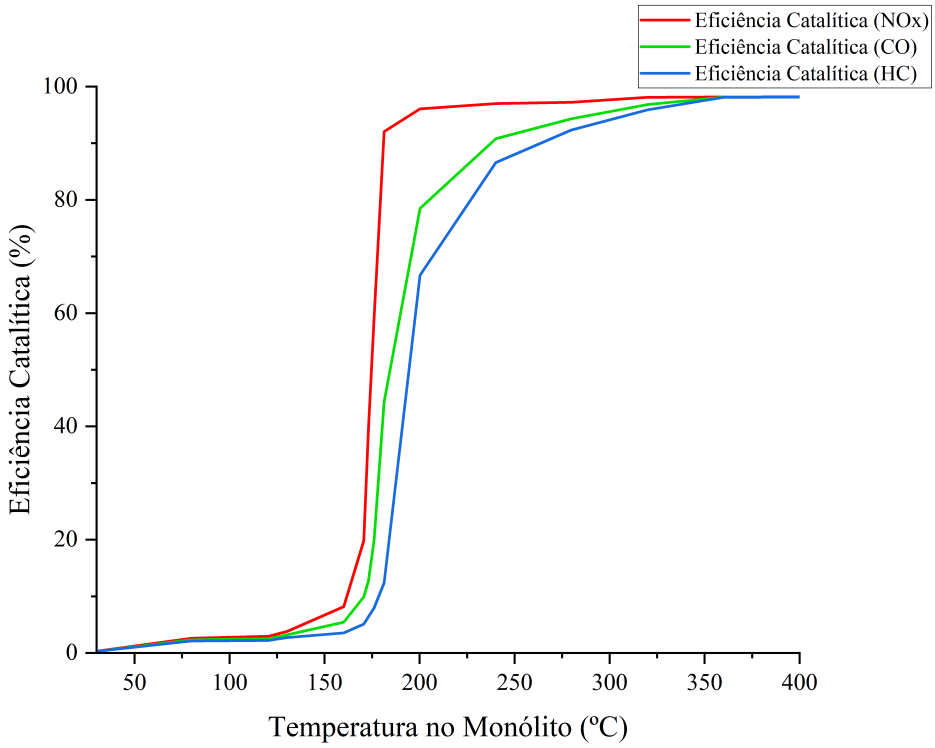


Figura 23 – Eficiências catalíticas.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Tabela 16 – Emissões (BR10): Experimental x Simulação

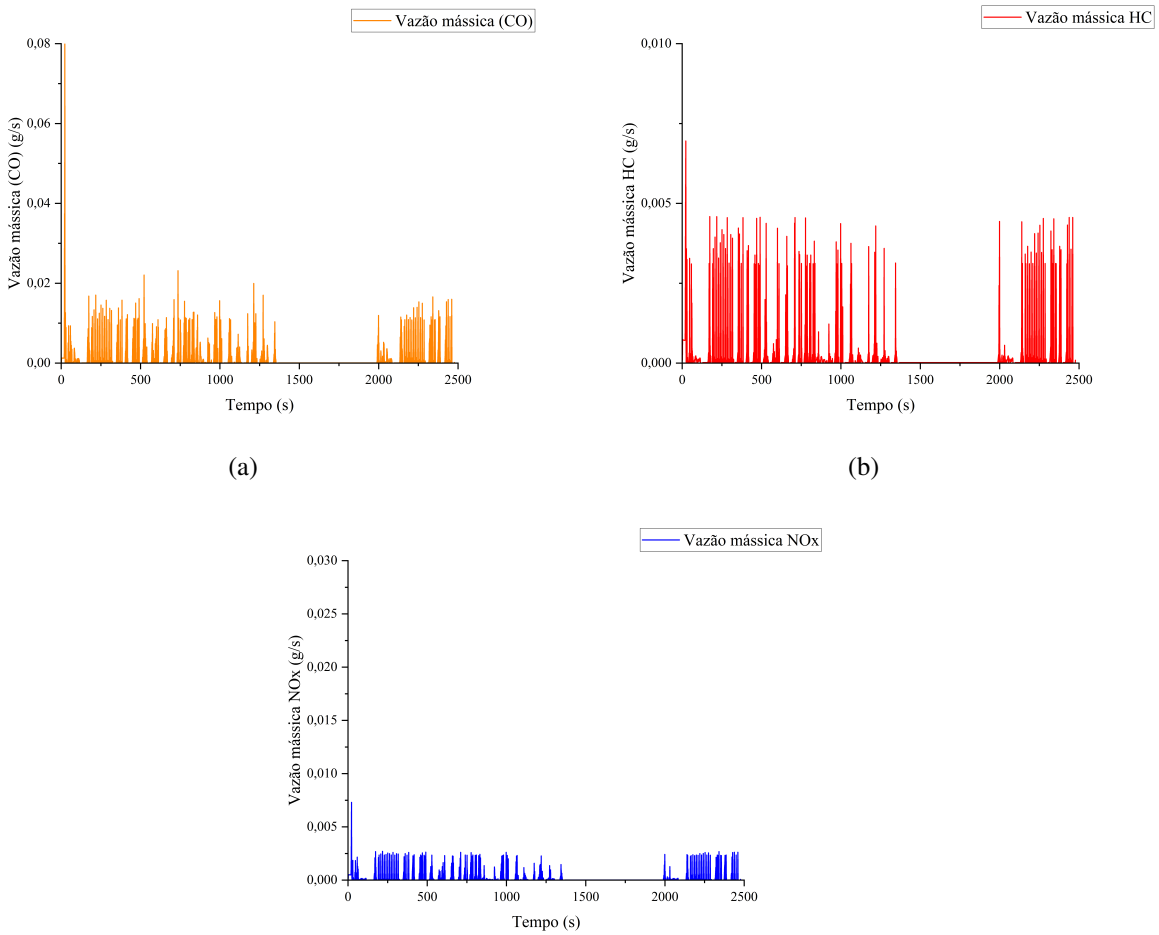
Descrição	Emissões	Valores (mg/km)	Erro (%)
Experimental	NO_x	25	-
	CO	158	-
	HC	35	-
Simulação	NO_x	25,56	2,24
	CO	160,56	1,62
	HC	35,82	2,34

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

5.3 Modelo BR10-HCCI à Etanol

Com o fim das simulações à Etanol convencional e com o modelo computacional validado. É essencial realizar uma análise minuciosa do desempenho do veículo com o MCI HCCI. Para tal, foram adicionados seus mapas de desempenho na Figura 25. Na Tabela 17 estão apresentadas a comparação entre as emissões e o consumo do etanol convencional e do HCCI etanol. Com relação às emissões, houve uma redução com o NO_x, entretanto as emissões de CO e de HC sofreram um aumento em relação ao convencional, de aproximadamente 1% e 7%, respectivamente. Os resultados obtidos seguem o que é apresentado na literatura com relação ao desempenho do HCCI, em trabalhos conduzidos por Heywood (2018), Brunetti

Figura 24 – Emissões tratadas (BR10-Etanol): (a) CO, (b) HC e (c) NO_X.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

(2018), Martins (2006) e Yao *et al.* (2009), são apontados esses aumentos nas emissões de CO e HC. Outro ponto que também foi levado em consideração com relação aos resultados foi a porcentagem de EGR utilizada no MCI de estudo HCCI, trabalhando em 55%, um valor bem acima do recomendado pelos estudos. Na Figura 26 estão representadas as emissões corrigidas pelo catalisador, respectivamente.

Tabela 17 – Variação do consumo e das emissões: BR10 x HCCI.

	Consumo (km/l)	Emissão de NO_x (mg/km)	Emissão de HC (mg/km)	Emissão de CO (mg/km)
Etanol	11,27	25,56	35,82	160,56
HCCI	11,57	24,58	36,16	171,99
Variação	-2,66%	-3,83%	+0,95%	+7,12%

Fonte: Elaborado pelo Autor(2024).

5.4 Modelo de um REEV à Etanol

Após as realizações das simulações envolvendo o HCCI e convencional a etanol. Foi o momento de realizar simulações com os REEV, inicialmente os mapas obtidos a partir dos ensaios em bancada dinamométrica do MCI BR10 foram incorporados ao modelo do REEV.

Com base na análise dos dados, foi definida a melhor velocidade do motor (RPM) com relação ao melhor consumo e emissões reduzidas, esse valor foi de 3.000 RPM. Conforme visualizado na Tabela 18, podemos ver esses valores de consumo, carga, torque e emissões de poluentes.

Tabela 18 – Valores relativos a rotação de 3.000 RPM.

Velocidade (RPM)	Torque (N.m)	Carga (%)	BSFC (g/kWh)	BSHC (g/kWh)	BSCO (g/kWh)	BSNOx (g/kWh)
3000	47,67	49	405,96	3,45	13,11	7,44

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Tabela 19 – Variação do consumo: BR10 x REEV.

Descrição	Consumo (km/l)
Etanol	11,27
REEV Etanol	13,74
Variação	+21,92%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Na Tabela 19 está apresentada a variação do consumo entre o modelo convencional do etanol e o REEV. Houve um ganho de 21,92% em comparação com o modelo convencional. O resultado com relação ao consumo de combustível segue o padrão de estudos realizados Wahono *et al.* (2016), Wahono *et al.* (2015) e Wang *et al.* (2022c). Outro ponto importante de ser ressaltado é que o combustível utilizado no presente trabalho foi o etanol, diferente da gasolina, utilizada nos trabalhos citados anteriormente. Na Figura 27 é apresentado o comportamento do consumo de carga bateria ao longo de todo o ciclo da simulação.

5.5 Modelo de um REEV-HCCI à Etanol

Com relação a configuração REEV HCCI, os dados analisados mostraram que a melhor faixa de operação para o MCI nesse regime seria na velocidade de 2.500 RPM. Conforme visualizado na Tabela 20, podemos ver os valores de consumo, carga, torque e emissões de poluentes para essa velocidade.

Tabela 20 – Valores relativos a rotação de 2.500 RPM.

Velocidade (RPM)	Torque (N.m)	Carga (%)	BSFC (g/kWh)	BSHC (g/kWh)	BSCO (g/kWh)	BSNOx (g/kWh)
2500	15,76	16	522,38	5,71	14,35	3,95

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Na Tabela 21 é apresentada a comparação entre o consumo de combustível entre a configuração REEV e a REEV-HCCI, houve um aumento de 14,63%. Na Tabela 22 é mostrada a variação entre as emissões de poluentes para as duas configurações de REEV.

Tabela 21 – Variação do consumo: REEV x REEV-HCCI.

Descrição	Consumo (km/l)
REEV	13,74
REEV-HCCI	15,75
Variação	+14,63%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Tabela 22 – Emissões: REEV x REEV-HCCI.

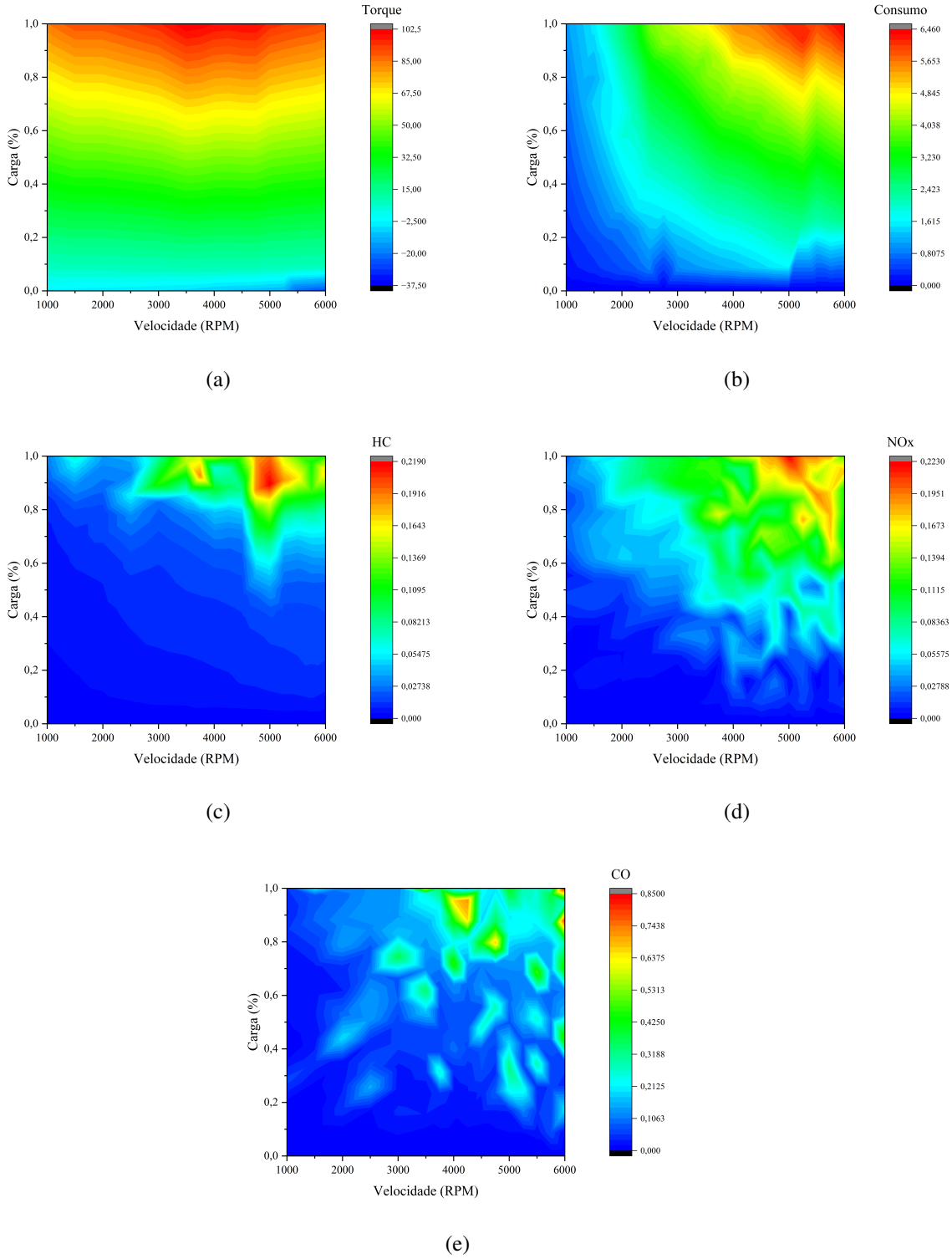
	CO (mg/km)	HC (mg/km)	NOx (mg/km)
REEV	383,43	75,19	134,35
REEV-HCCI	872,18	87,56	194,50
Variação (%)	+127,47	+16,42	+44,77

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Os valores obtidos com relação as emissões são similares ao do estudo realizado por Wang *et al.* (2022c) para um ciclo de condução urbano. O aumento com relação as emissões de CO, HC e NO_x para o modelo REEV-HCCI é justificada pela porcentagem de EGR a qual o MCI foi submetido, 55%. Na Figura 28 é apresentado a evolução do estado de carga da bateria das duas configurações ao longo das simulações.

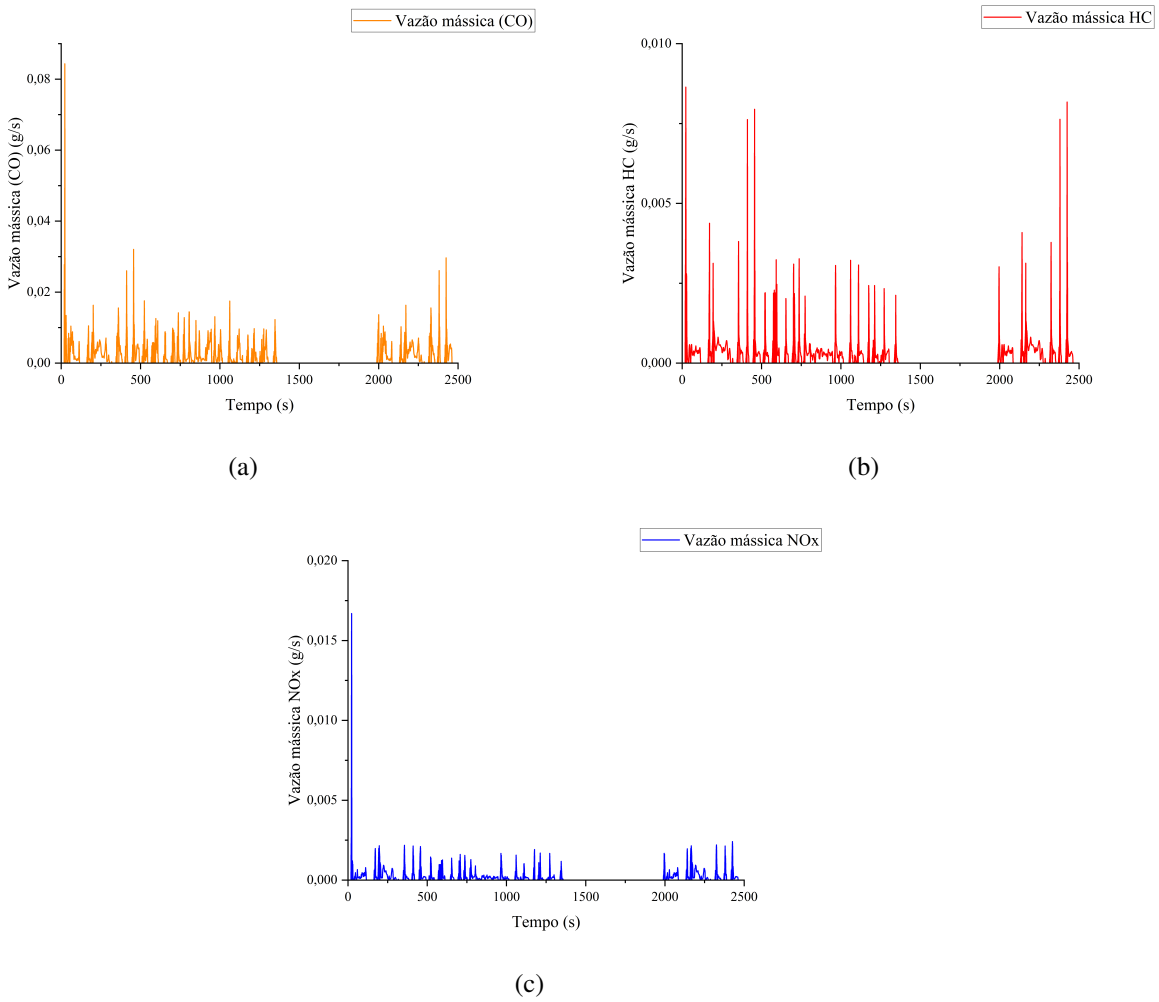
A análise detalhada dos resultados obtidos ao final do presente trabalho mostram que a configuração REEV-HCCI possui um melhor consumo de combustível quando comparada a configuração REEV. Entretanto o aumento nas emissões pode ser um impeditivo para a sua implementação, já que é importante levar em conta as particularidades do método HCCI, com relação a sua faixa de operação e porcentagem de EGR utilizada.

Figura 25 – Mapas de desempenho do BR10-HCCI à Etanol: (a) Torque, (b) Consumo, (c) HC, (d) NO_X e (e) CO.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

Figura 26 – Emissões tratadas do BR10-HCCI à Etanol: (a) CO, (b) HC e (c) NO_x.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

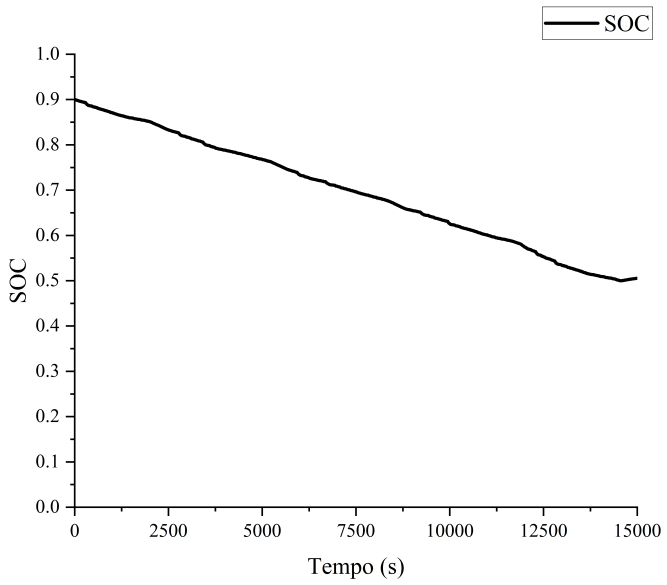


Figura 27 – Comportamento da carga da bateria ao longo da simulação.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

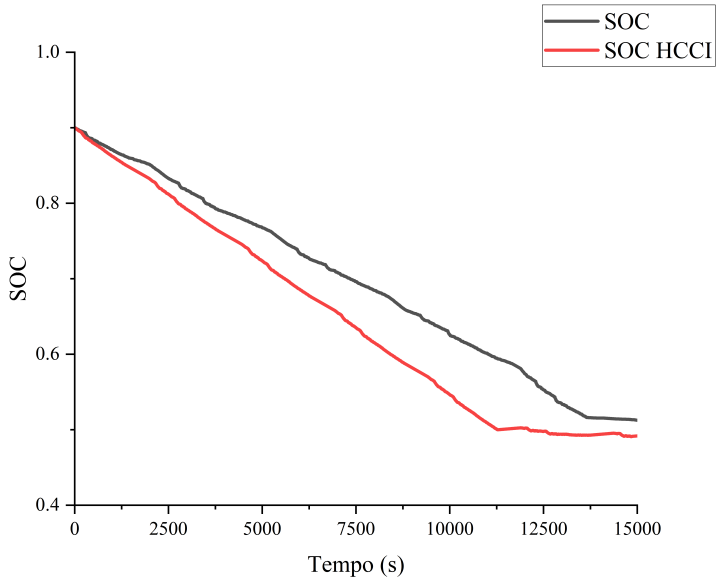


Figura 28 – Comportamento da carga da bateria ao longo da simulação: REEV x REEV-HCCI.
Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

6 CONCLUSÃO

A etapa de obtenção dos mapas de desempenho do MCI BR10 foi realizada sem grandes dificuldades. O processo consistiu no tratamento e na combinação dos dados experimentais, facilitando a geração desses mapas que foram utilizados para a construção do modelo computacional. Para a validação do veículo de testes, a obtenção de um erro relativo menor do que 1% reforça a segurança e a qualidade do modelo computacional criado, demonstrando que o modelo utilizado consegue representar de forma precisa o comportamento do veículo em condições reais de ciclo de condução.

Com relação ao catalisador de três vias, desenvolvido em *Python*, os resultados foram satisfatórios, com o maior erro menor do que 3,0%, estando dentro dos limites aceitáveis para esse tipo de simulação. Para melhorar o modelo numérico, foi realizada uma otimização dos parâmetros utilizados, obtendo assim um retrato mais fiel à realidade.

Os resultados obtidos com o modelo convencional HCCI foram considerados satisfatórios, especialmente devido ao melhor consumo de combustível e redução nas emissões de NO_x. Houve um aumento nas emissões de CO e de HC, devido as particularidades desse método de combustão. Levando esses fatores em conta, pode-se afirmar que modelo convencional HCCI alcançou o objetivo que foi proposto.

O modelo REEV apresentou resultados satisfatórios em relação ao consumo de combustível, representando um ganho de 21,92% em relação ao modelo convencional. Já o modelo REEV-HCCI apresentou um ganho de 14,63% em relação ao consumo de combustível. O aumento nas emissões é devido a particularidades do funcionamento do MCI nessa configuração, operando de forma constante e em uma única faixa de velocidade. Mas os resultados estão de acordo com o que foi apresentado na literatura para a simulação de veículos REEV.

Concluindo, os resultados alcançados ao final do presente trabalho demonstram que o seu desenvolvimento e validação para a dinâmica do veículo, consumo de combustível e emissões foram alcançados de forma satisfatória. Destacando o potencial das metodologias aplicadas quando analisadas as suas aplicabilidades no contexto automotivo, contribuindo assim para os avanços na modelagem e análise de REEV.

REFERÊNCIAS

ABIDIN, S. F. Z.; KHALID, A.; ZANALLI, S.; ZAHARI, I.; JALAL, R. I. A.; ABAS, M. A.; KOTEN, H. The effect of 48v mild hybrid technology on fuel consumption of a passenger car by using simulation cycle. **Case Studies in Thermal Engineering**, Elsevier Ltd, v. 28, 12 2021. ISSN 2214157X.

ABNT. **ABNT NBR 6601: Veículos rodoviários automotores leves - determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento**. ABNT, 2005. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=895tkQEACAAJ>.

ADCOCK, I. **ICE Braker!** 2017. Disponível em: <https://www.sae.org/news/2017/09/ice-breaker>. Acesso em: 04 abril 2024.

AEA, C. T. de Pesados da. Euro vi - análise. **Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA)**, 2015.

AGARWAL, A. K.; SINGH, A. P.; MAURYA, R. K. Evolution, challenges and path forward for low temperature combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, Elsevier Ltd, v. 61, p. 1–56, 2017. ISSN 03601285.

AGENCY, U. S. E. P. **EPA Federal Test Procedure (FTP)**. 2015. Disponível em: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-federal-test-procedure-ftp>. Acesso em: 30 setembro 2024.

AMBIENTE, M. do M. **Definições - Ciclo de Condução**. 2024. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/defini%C3%A7%C3%B5es.html#Limite%20de%20Emiss%C3%A3o>. Acesso em: 18 nov. 2024.

ARCENTALES, D.; SILVA, C.; RAMIREZ, A. D. Environmental analysis of road transport: Sugarcane ethanol gasoline blend flex-fuel vs battery electric vehicles in ecuador. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Elsevier Ltd, v. 118, 5 2023. ISSN 13619209.

BRANCO, J. E. H.; ROCHA, F. V. da; PéRA, T. G.; BASTIANI, F. P. de; BARTHOLOMEU, D. B.; COSTA, E. L.; JUNIOR, I. G. Assessing greenhouse gas emissions and costs of brazilian light-duty vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier Ltd, v. 206, 12 2024. ISSN 18790690.

BRASIL. Resolução n.492. **Ministério do Meio Ambiente**, 2018.

BRASIL. **Etanol**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/etanol>. Acesso em: 07 maio 2024.

BRASIL. **Programa de controle de emissões veiculares (PROCONVE)**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>. Acesso em: 13 maio 2024.

BRASIL. Resolução nº 907. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, 2022.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. 1ª. ed. [S.l.]: Blucher, 2012. Volume 2. ISBN 978-8521207092.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. 2ª. ed. [S.l.]: Blucher, 2018. Volume 1. ISBN 978-8521212935.

DAW, C. S.; WAGNER, R. M.; EDWARDS, K. D.; GREEN, J. B. Understanding the transition between conventional spark-ignited combustion and hcci in argasoline engine. **Proceedings of the Combustion Institute**, Elsevier Ltd, v. 31 II, p. 2887–2894, 2007. ISSN 15407489.

DENTON, T. **Veículos Elétricos e Híbridos**. 1ª. ed. [S.l.]: Blucher, 2018. ISBN 978-8521213017.

DUAN, X.; LAI, M. C.; JANSONS, M.; GUO, G.; LIU, J. A review of controlling strategies of the ignition timing and combustion phase in homogeneous charge compression ignition (hcci) engine. **Fuel**, Elsevier Ltd, v. 285, 2 2021. ISSN 00162361.

GUO, R.; LI, L.; SUN, Z.; XUE, X. An integrated thermal management strategy for cabin and battery heating in range-extended electric vehicles under low-temperature conditions. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier Ltd, v. 228, 6 2023. ISSN 13594311.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 2ª. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2018.

HUNICZ, J.; MIKULSKI, M.; KOSZAłKA, G.; IGNACIUK, P. Detailed analysis of combustion stability in a spark-assisted compression ignition engine under nearly stoichiometric and heavy egr conditions. **Applied Energy**, Elsevier Ltd, v. 280, 12 2020. ISSN 03062619.

ISLAMEKA, M.; BUDIMAN, B. A.; JUANGSA, F. B.; AZIZ, M. **Emerging Trends in Energy Storage Systems and Industrial Applications**. [S.l.]: Academic Press, 2023. ISBN 978-0-323-90521-3.

KARVOUNTZIS-KONTAKIOTIS, A.; ANDWARI, A. M.; PESYRIDIS, A.; RUSSO, S.; TUCCILLO, R.; ESFAHANIAN, V. Application of micro gas turbine in range-extended electric vehicles. **Energy**, Elsevier Ltd, v. 147, p. 351–361, 3 2018. ISSN 03605442.

KRISHNAMOORTHI, M.; MALAYALAMURTHI, R.; HE, Z.; KANDASAMY, S. A review on low temperature combustion engines: Performance, combustion and emission characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier Ltd, v. 116, 12 2019. ISSN 18790690.

LARIMORE, J.; HELLSTRöM, E.; STERNIAK, J.; JIANG, L.; STEFANOPOULOU, A. G. Experiments and analysis of high cyclic variability at the operational limits of spark-assisted hcci combustion. In: **2012 American Control Conference (ACC)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 2072–2077.

LEACH, F.; KALGHATGI, G.; STONE, R.; MILES, P. The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. **Transportation Engineering**, v. 1, p. 100005, 2020. ISSN 2666-691X.

LU, B.; SHI, L.; SUN, X.; YAO, Y.; ZHANG, Y.; TIAN, H.; SHU, G. Unlocking the multi-mode energy-saving potential of a novel integrated thermal management system for range-extended electric vehicle. **Energy Conversion and Management**, Elsevier Ltd, v. 293, 10 2023. ISSN 01968904.

MANDALHO, L. **Poluentes Atmosféricos**. 2013. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos.html>. Acesso em: 16 maio 2024.

MARTINS, J. **Motores de Combustao Interna**. 2ª. ed. [S.l.]: Publindústria, 2006. ISBN 972-8953-02-X.

MARTYR, A. J.; PLINT, M. A. **Engine Testing: The Design, Building, Modification and Use of Powertrain Test Facilities**. 4ª. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-0-08-096949-7.

MURTA, M. H. N. **Simulação do Ciclo Padrão de Emissões U.S. FTP-75 (NBR6601) em Dinamômetro de Bancada**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2008.

NOGUCHI, M.; TANAKA, Y.; TANAKA, T.; TAKEUCHI, Y. A study on gasoline engine combustion by observation of intermediate reactive products during combustion. In: **1979 SAE International Off-Highway and Powerplant Congress and Exposition**. [S.l.]: SAE International, 1979. ISSN 0148-7191.

ONISHI, S.; JO, S. H.; SHODA, K.; JO, P. D.; KATO, S. Active thermo-atmosphere combustion (atac) - a new combustion process for internal combustion engines. In: **1979 Automotive Engineering Congress and Exposition**. [S.l.]: SAE International, 1979. ISSN 0148-7191.

QIAO, J.; CHEN, F.; LIU, J.; GUAN, J.; WANG, S.; LI, Y. Numerical study on the performance, combustion characteristics and energy flow distribution of gasoline-powered vehicle under synthetic actual driving test cycle. **Energy**, Elsevier Ltd, v. 293, 4 2024. ISSN 03605442.

REALIS. **IGNITE User Manual**. 2024.

RENAULT. **Ficha Técnica - Renault Sandero Stepway**. 2023.

SCHIEHLEN, W. O. Simulation based design of automotive systems. In: HAUG, E. J. (Ed.). [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993. p. 303–337. ISBN 978-3-642-78119-3.

SQUALLI, J. Greening the roads: Assessing the role of electric and hybrid vehicles in curbing co2 emissions. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 434, 1 2024. ISSN 09596526.

TATE, E. D.; HARPSTER, M. O.; SAVAGIAN, P. J. The electrification of the automobile: From conventional hybrid, to plug-in hybrids, to extended-range electric vehicles. **SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems**, v. 1, p. 156–266, 2008. ISSN 1946-4614.

Hasy Environment. **Three-way catalytic exhaust treatment unit**. 2019. Disponível em: <https://xulymoitruong360.com/en/three-way-catalytic-exhaust-treatment-unit.html>. Acesso em: 18 nov. 2024.

Internacional Energy Agency. **Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>. Acesso em: 21 ago. 2023.

Renault Europe. **New Renault Clio**. 2024.

TSUKIJI, T.; ZHANG, N.; JIANG, Q.; HE, B. Y.; MA, J. A multifaceted equity metric system for transportation electrification. **IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems**, IEEE, v. 4, p. 690–707, 2023.

WAHONO, B.; NUR, A.; SANTOSO, W. B.; PRAPTIJANTO, A. A comparison study of range-extended engines for electric vehicle based on vehicle simulator. **Journal of Mechanical Engineering and Sciences**, Universiti Malaysia Pahang, v. 10, p. 1803–1816, 6 2016. ISSN 22318380.

WAHONO, B.; SANTOSO, W. B.; NUR, A.; AMIN. Analysis of range extender electric vehicle performance using vehicle simulator. In: **Energy Procedia**. [S.l.]: Elsevier Ltd, 2015. v. 68, p. 409–418. ISSN 18766102.

WANG, S.; LI, Y.; FU, J.; LIU, J.; DONG, H. Numerical research on the performance, combustion and energy flow characteristics of gasoline-powered vehicle under wltc. **Fuel**, Elsevier Ltd, v. 285, 2 2021. ISSN 00162361.

WANG, X.; GAO, J.; CHEN, Z.; CHEN, H.; ZHAO, Y.; HUANG, Y.; CHEN, Z. Evaluation of hydrous ethanol as a fuel for internal combustion engines: A review. **Renewable Energy**, v. 194, p. 504–525, 2022. ISSN 0960-1481.

WANG, Y.; BISWAS, A.; RODRIGUEZ, R.; KESHAVARZ-MOTAMED, Z.; EMADI, A. **Hybrid electric vehicle specific engines: State-of-the-art review**. [S.l.]: Elsevier Ltd, 2022. 832-851 p.

WANG, Y.; WEN, Y.; ZHU, Q.; LUO, J.; YANG, Z.; SU, S.; WANG, X.; HAO, L.; TAN, J.; YIN, H.; GE, Y. Real driving energy consumption and co2 pollutant emission characteristics of a parallel plug-in hybrid electric vehicle under different propulsion modes. **Energy**, Elsevier Ltd, v. 244, 4 2022. ISSN 03605442.

YAO, M.; ZHENG, Z.; LIU, H. Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (hcci) engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 35, p. 398–437, 10 2009. ISSN 03601285.