UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CLAUDECIR FERNANDES DE FREITAS MOURA JÚNIOR

IMPACTO DA TECNOLOGIA HCCI NO DESEMPENHO E EMISSÕES DE GASES POLUENTES EM VEÍCULOS HÍBRIDOS

FORTALEZA

2024

CLAUDECIR FERNANDES DE FREITAS MOURA JÚNIOR

IMPACTO DA TECNOLOGIA HCCI NO DESEMPENHO E EMISSÕES DE GASES POLUENTES EM VEÍCULOS HÍBRIDOS

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)

M885i Moura Júnior, Claudecir Fernandes de Freitas.
Impacto da tecnologia HCCI no desempenho e emissões de gases poluentes em veículos híbridos / Claudecir Fernandes de Freitas Moura Júnior. – 2024.
107 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. Python. 3. Catalisador. 4. Motores de combustão interna. I. Título.
CDD 620.1

CLAUDECIR FERNANDES DE FREITAS MOURA JÚNIOR

IMPACTO DA TECNOLOGIA HCCI NO DESEMPENHO E EMISSÕES DE GASES POLUENTES EM VEÍCULOS HÍBRIDOS

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: 28/11/2024

BANCA EXAMINADORA

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

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

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que tem sido meu guia e força ao longo de toda esta jornada. Sua presença constante me deu forças nos momentos mais difíceis e nunca me deixou desamparado, mesmo no momento de maior desafio da minha vida. Pela Sua graça, pude superar obstáculos e avançar, com fé e confiança em Seu cuidado. A Ele, toda a minha gratidão, por estar comigo em cada passo desse processo, proporcionando-me sabedoria, serenidade e persistência para seguir em frente.

Gostaria de agradecer à minha mãe (*in memorian*), cuja presença e apoio sempre me motivou. Durante toda a minha trajetória, ela esteve ao meu lado, oferecendo amor, compreensão e acreditando em mim em todas as situações. Hoje, a saudade que carrego é eterna e a dor da sua ausência é imensa, mas sei que o legado do seu amor e os ensinamentos que ela me deixou continuam guardados em meu coração. A você, mãe, minha eterna gratidão e carinho por tudo o que foi e que continua sendo para mim.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha família, pelo apoio durante o período tão desafiador que passei. Em especial, agradeço ao Igor, à Karol e à Jociana, que estiveram ao meu lado com cuidado e dedicação, oferecendo suporte constante no momento mais difícil da minha vida. O carinho, a paciência e a presença de todos foram essenciais para que eu pudesse conseguir chegar aqui, e serei sempre grato por tudo o que fizeram por mim.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão aos colegas que conheci ao longo dessa trajetória, que contribuíram de diversas formas para o meu crescimento pessoal e acadêmico. Também sou grato pelos novos amigos que surgiram durante esse período, que com suas energias e perspectivas, enriqueceram minha jornada.

Gostaria de expressar minha gratidão ao Prof. Dr. André 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. Agradeço por compartilhar sua expertise e por estar sempre disponível para esclarecer dúvidas.

Agradeço aos professores Dr. Paulo Alexandre e Dr. José Velasquez, que compuseram a banca, pela valiosa contribuição ao meu trabalho, pelas críticas construtivas e pela disponibilidade em compartilhar seu conhecimento. Suas análises foram essenciais para o aprimoramento deste estudo, e sou grato pela dedicação e pelo tempo investido na avaliação do meu trabalho. A orientação de todos foi fundamental para o crescimento da pesquisa e para o alcance dos resultados aqui apresentados.

Agradeço ao programa Rota 2030 pela manutenção da bolsa, que foi fundamental 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. Sou grato pelo apoio financeiro e pelo incentivo ao aprimoramento de minha formação acadêmica e profissional.

"Teus, ó Senhor, são a grandeza, o poder, a glória, a majestade e o esplendor, pois tudo o que há nos céus e na terra é teu. Teu, ó Senhor, é o reino; tu estás acima de tudo."

(1 Crônicas 29:11)

RESUMO

Este estudo teve como objetivo analisar as emissões de gases poluentes, avaliando diferentes configurações de veículos utilizando dois tipos de sistemas de propulsão. Para cada configuração de sistema de propulsão, foram testados tanto um motor convencional de combustão interna quanto um motor *Homogeneous Charge Compression Ignition* (HCCI). As simulações foram realizadas utilizando o software IGNITE, e os gases de exaustão foram tratados por um catalisador modelado em Python. O modelo computacional do veículo Renault Sandero demonstrou boa precisão, com erros de validação abaixo de 1%, enquanto o modelo do catalisador apresentou um erro máximo de emissão abaixo de 3%. Os resultados indicaram que a configuração convencional de sistema de propulsão com o motor HCCI apresentou desempenho superior em comparação ao motor convencional. Em contraste, o modelo de sistema de propulsão híbrido mostrou resultados insatisfatórios, sugerindo a necessidade de otimizações adicionais. Portanto, foi realizada uma análise aprofundada de gestão de energia para maximizar a utilização do motor HCCI na configuração híbrida, com a expectativa de melhorar a eficiência e reduzir as emissões..

Palavras-chave: Etanol. Python. Catalisador. Motores de combustão interna.

ABSTRACT

This study aimed to analyze pollutant gas emissions by evaluating different vehicle configurations using two types of powertrains. For each powertrain configuration, both a conventional internal combustion engine and a HCCI engine were tested. The simulations were performed using IGNITE software, and the exhaust gases were treated by a catalyst modeled in Python. The computational model of the Renault Sandero vehicle demonstrated good accuracy, with validation errors below 1%, while the catalyst model showed a maximum emission error below 3%. The results indicated that the conventional powertrain configuration with the HCCI engine performed better compared to the conventional engine. In contrast, the hybrid powertrain model showed unsatisfactory results, suggesting the need for further optimizations. Therefore, an in-depth energy management analysis was conducted to maximize the utilization of the HCCI engine in the hybrid configuration, with the expectation of improving efficiency and reducing emissions.

Keywords: Ethanol. Gasoline. Catalyzer. Python. Internal combustion engines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparativo de emissões dos motores. 23
Figura 2 – Ciclo FTP-75 27
Figura 3 – Configuração da câmara de combustão HCCI 28
Figura 4 – Veículo convencional simulado no IGNITE 31
Figura 5 – Componente '*BasicEngine*' do IGNITE 33
Figura 6 – Componente '*GearBox*' do IGNITE 33
Figura 7 – Veículo híbrido simulado no IGNITE 35
Figura 8 – Componente '*MotorGenerator*' do IGNITE 36
Figura 9 – Componente '*ParallelHybridController*' do IGNITE 37
Figura 10 – Fluxograma de funcionamento do modelo de catalisador 39
Figura 11 – Mapas de desempenho do BR10: (a) Torque, (b) Consumo, (c) Temperatura, (d) NO_x, (e) CO e (f) HC. 44
Figura 12 – Mapas de desempenho do BR10 corrigido para regime HCCI: (a) Torque, (b) Consumo, (c) NO_x, (e) CO e (f) HC. 46
Figura 13 – Consumo do modelo numérico simulado 47
Figura 14 – Resultado ótimo do catalisador 48
Figura 15 – Evolução do modelo catalisador no processo de otimização 49
Figura 16 – Medição x Previsão da variável temperatura no modelo numérico do catalisador 50
Figura 17 – Eficiências catalíticas 51
Figura 18 – Emissões corrigidas pelo catalisador para o veículo convencional. (a) CO, (b) HC e (c) NO_x 52
Figura 19 – Regime de operação de consumo de combustível específico: (a) HCCI (b) ICe 55
Figura 20 – Regime de operação de emissão de HC específico: (a) HCCI (b) ICe 55
Figura 21 – Regime de operação de emissão de CO específico: (a) HCCI (b) ICe 56
Figura 22 – Regime de operação de emissão de NO_x específico: (a) HCCI (b) ICe 56
Figura 23 – Consumo para as configurações híbridas 58
Figura 24 – Estado da bateria para as configurações híbridas 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites definidos pelo CONAMA 18
Tabela 2 – Proconve L7. 19
Tabela 3 – Especificação do BR10 25
Tabela 4 – Demais parâmetros definidos no modelo convencional e de combustão avançada 34
Tabela 5 – Parâmetros definidos no controlador híbrido 38
Tabela 6 – Especificação do processo de otimização 42
Tabela 7 – Validação do modelo convencional do IGNITE 47
Tabela 8 – Validação do modelo numérico do catalisador 53
Tabela 9 – Consumo e emissões do veículo convencional e HCCI ao longo do ciclo de condução 53
Tabela 10 – Emissões para as configurações híbridas 59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algorítmo Genético
CO	Monóxido de Carbono
CO_2	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DDFS	*Direct Dual Fuel Stratification*
GEE	Gases de Efeito Estufa
HC	Hidrocarbonetos totais não queimados
HCCI	*Homogeneous Charge Compression Ignition*
ICe	Ignição por Centelha
ICo	Ignição por Compressão
IEA	*International Energy Agency*
LHMT	Laboratório de Hidrogênio e Máquinas Térmicas
MCI	Motor de Combustão Interna
MP	Material Particulado
NMOG	Gases Orgânicos Não Metano
NO_x	Óxidos de Nitrogênio
PCCI	*Premixed Charged Compression Ignition*
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PROMOT	Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares
RCCI	*Reactivity Controlled Compression Ignition*
RMSE	*Root Mean Square Error*
SO_2	Dióxido de Enxofre
USEPA	*United States Environmental Protection Agency*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 Estrutura do trabalho 16
2 OBJETIVOS 17
2.1 Objetivo geral 17
2.2 Objetivos específicos 17
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 18
3.0.1 Emissões veiculares 18
3.0.1.1 Óxidos de nitrogênio *19*
3.0.1.2 Monóxido de carbono *20*
3.0.2 Combustão avançada 21
3.1 Propulsão alternativa a combustão 23
3.1.1 Veículos elétricos a bateria 23
3.1.2 Veículos elétricos híbridos 24
4 MATERIAIS E MÉTODOS 25
4.1 Motor em estudo 25
4.2 Ensaio dinamométrico 26
4.3 Modo de operação HCCI 27
4.4 Ciclo de condução 29
4.4.1 Powertrain convencional 30
4.4.2 Powertrain híbrido 35
4.5 Catalisador automotivo 38
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 43
5.1 Ensaios experimentais 43
5.2 Validação do modelo numérico do veículo 45
5.3 Validação do catalisador 48
5.4 Veículo com modo de combustão HCCI 53
5.4.1 Regime de operação dos modelos de powertrain convencional 54
5.5 Veículo híbrido com motores em paralelo 57
5.5.1 Desempenho dos modelos híbridos 57
5.5.2 Estado da bateria para as configurações híbridas 59

6 **CONCLUSÃO** 62
REFERÊNCIAS 64
APÊNDICES 68
APÊNDICE A – Códigos-fontes utilizados 68
APÊNDICE B – Relatório de otimização 74

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade pela redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) têm colocado o setor automotivo no centro dos debates sobre sustentabilidade . Dados da *International Energy Agency* (IEA) indicam que o setor de transportes é responsável por cerca de um quarto das emissões globais de Dióxido de Carbono (CO_2), com os veículos leves contribuindo significativamente para esse total (International Energy Agency, 2022; International Energy Agency, 2023). Entretanto, a transição para formas de transporte mais sustentáveis enfrenta uma série de desafios técnicos, econômicos e sociais. Enquanto a eletrificação do transporte tem sido amplamente promovida como uma solução de longo prazo, ela ainda está longe de ser uma realidade em muitos países , devido a questões como os altos custos de produção, limitações na infraestrutura de recarga e a dependência de materiais críticos para a produção de baterias (TSUKIJI *et al.*, 2023). Diante desse cenário, surge a necessidade de explorar soluções que sejam viáveis tanto em termos ambientais quanto em termos econômicos.

Além dos desafios da eletrificação, o uso contínuo do Motor de Combustão Interna (MCI) em grande parte da frota global de veículos levanta preocupações quanto ao impacto ambiental. A dependência de combustíveis fósseis não apenas contribui para as emissões de CO_2, mas também gera poluentes locais, como Óxidos de Nitrogênio (NO_x) e Hidrocarbonetos totais não queimados (HC), que afetam diretamente a qualidade do ar nas áreas urbanas. De acordo com a Organização Mundial da Saúde, a poluição do ar é responsável por milhões de mortes prematuras a cada ano, e os veículos a combustão são um dos principais contribuintes para esse problema (World Health Organization, 2018; World Health Organization, 2021). Nesse contexto, a transição para alternativas de menor impacto ambiental, como os biocombustíveis e tecnologias híbridas, torna-se uma prioridade para o setor.

Embora o setor automotivo esteja em processo de transformação, essa mudança não é homogênea entre os diferentes países e regiões. Enquanto países desenvolvidos estão avançando rapidamente em direção à eletrificação, outras regiões, especialmente aquelas com economias emergentes, continuam dependentes dos MCI's devido à infraestrutura limitada e ao custo elevado de adoção de novas tecnologias (International Energy Agency, 2023). No Brasil, por exemplo, o uso de combustíveis fósseis, como a gasolina, ainda é predominante. Contudo, o país possui uma vantagem estratégica ao ser um dos maiores produtores de etanol do mundo, um biocombustível que pode desempenhar um papel crucial na descarbonização do setor de

transportes (GLYNIADAKIS; BALESTIERI, 2023). O desafio, portanto, é encontrar formas de adaptar as tecnologias existentes, como os motores de combustão interna, para maximizar a eficiência no uso de combustíveis renováveis, como o etanol.

Em resposta a esses desafios, diversas iniciativas têm sido desenvolvidas globalmente para reduzir as emissões do setor automotivo. A eletrificação, que inclui tanto veículos elétricos a bateria quanto veículos elétricos híbridos, é uma das abordagens mais promissoras. Veículos híbridos, em particular, representam uma solução intermediária ao combinar a propulsão elétrica com o motor de combustão, proporcionando uma redução significativa nas emissões sem comprometer a autonomia do veículo (MCLAREN *et al.*, 2016; KHOURY; NADER, 2021). Além disso, veículos elétricos e híbridos tem se popularizado, a hibridização permite que o motor a combustão seja utilizado de maneira mais eficiente, reduzindo a carga sobre ele e, consequentemente, as emissões de poluentes locais (ANSELMA *et al.*, 2020). Em países como o Japão e a União Europeia, políticas de incentivo à compra de veículos híbridos têm mostrado resultados promissores na redução das emissões veiculares.

Outra abordagem relevante para mitigar as emissões no setor automotivo é o uso de biocombustíveis, como o etanol, que é considerado neutro em carbono, pois o CO_2 emitido durante sua combustão é compensado pelo CO_2 absorvido durante o crescimento das plantas usadas em sua produção, com pesquisadores sugerindo o E100 como o combustível de álcool ideal para o motores a centelha (YAO *et al.*, 2013; CELIK; COLAK, 2008). O Brasil, com sua vasta experiência no uso de etanol, é um exemplo notável de como os biocombustíveis podem ser integrados à frota existente, contribuindo para a redução das emissões de GEE (NOGUEIRA *et al.*, 2024). No entanto, para maximizar os benefícios ambientais, é necessário adaptar os motores de combustão interna para operar de forma mais eficiente com esses combustíveis. Tecnologias como a combustão fria, que permite uma ignição a temperaturas mais baixas e, portanto, reduz a formação de poluentes, estão sendo investigadas como soluções viáveis para essa transição.

O desenvolvimento de motores que utilizam o conceito de combustão fria é uma área de pesquisa que tem recebido crescente atenção nos últimos anos. Esse método de combustão, ao operar com ignição controlada e a temperaturas mais baixas, minimiza a produção de poluentes como NO_x e HC, em troca do aumento de concentração Monóxido de Carbono (CO) (GHAREHGHANI, 2019). A literatura recente tem mostrado que, ao combinar a combustão fria com biocombustíveis, como o etanol, é possível alcançar uma significativa redução nas emissões de GEE, ao mesmo tempo em que se mantém um nível aceitável de eficiência energética. Pesquisas

conduzidas por Zhang *et al.* (2022) demonstraram que o uso de etanol em motores de combustão fria pode resultar em uma redução de até 75% nas emissões de CO_2 em comparação com motores tradicionais, sem comprometer o desempenho do veículo. Esses avanços indicam que os motores de combustão interna ainda têm um papel crucial a desempenhar na transição para uma matriz energética mais limpa.

Com base na literatura e soluções já existentes, o presente trabalho propõe a adaptação de motores de combustão interna para o uso de etanol em um sistema de combustão HCCI, possibilitando a ignição do motor em condições de temperatura mai baixa. A proposta é explorar o potencial dos motores atuais, em vez de proceder com uma substituição integral por novas tecnologias, buscando uma solução economicamente viável para a descarbonização da frota automotiva. Além disso, o estudo visa avaliar o impacto ambiental da hibridização veicular, considerando o uso combinado de propulsão elétrica e motores a etanol em sistemas híbridos. Com essa abordagem, espera-se não apenas reduzir as emissões de GEE, mas também minimizar a dependência de combustíveis fósseis e, ao mesmo tempo, garantir a viabilidade econômica e a autonomia dos veículos.

1.1 Estrutura do trabalho

Ao final deste primeiro capítulo, é importante salientar a estrutura subsequente deste trabalho. O Capítulo 2 expõe os objetivos que se pretende atingir com o estudo. No Capítulo 3, é realizada uma revisão teórica abrangente, abordando os conceitos fundamentais e destacando as lacunas existentes na área de pesquisa. O Capítulo 4 detalha a metodologia utilizada para alcançar os objetivos propostos. No Capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados obtidos até o momento. Por fim, o Capítulo 6 oferece as conclusões, sintetizando os principais achados e suas implicações para o campo de estudo.

2 OBJETIVOS

Neste capítulo estão descritos os objetivos deste trabalho, portanto, nos tópicos a seguir são apresentados os objetivos específicos e o objetivo geral do estudo.

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é propor configurações veiculares que priorizem simultaneamente a melhora do consumo de combustível e a redução das emissões poluentes. Para tanto, será utilizado um modelo de simulação unidimensional que permitirá avaliar o comportamento dinâmico e energético do veículo sob diferentes condições operacionais.

2.2 Objetivos específicos

Com o intuito de alcançar o objetivo geral do trabalho, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

1. Obter mapas de calibração do motor BR10;
2. Obter mapas de calibração do motor BR10 com tecnologia HCCI;
3. Validar o modelo computacional do veículo Renault Sandero;
4. Desenvolver modelo numérico do catalisador automotivo em Python;
5. Modificar modelo computacional para atuar em regime HCCI;
6. Modificar modelo computacional para atuar em regime híbrido para as duas configurações de MCI's;
7. Desenvolver modelo numérico de veículo híbrido que possua melhor relação de operação entre os motores.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo está descrito o aprofundamento teórico dos principais tópicos que motivaram e auxiliam o desenvolvimento desse trabalho.

3.0.1 Emissões veiculares

Como resultado do processo de combustão dos MCI's, gases são expelidos no ar atmosférico que é composto majoritariamente de nitrogênio e oxigênio, com composições aproximadas de 79% e 21%, respectivamente. Diante disso, normas têm sido estabelecidas com o intuito de controlar a quantidade de gases poluentes emitidos pelos veículos automotores. De acordo com a legislação ambiental vigente (Brasil, 1981), poluente é qualquer substância que, de acordo com sua concentração no ar atmosférico, pode ser nociva aos seres vivos ou ao meio ambiente, causando, assim, degradação na qualidade do ar.

As principais substâncias indesejadas, resultantes de um processo de combustão, encontradas na atmosfera são Dióxido de Enxofre (SO_2), NO_x, HC, Material Particulado (MP) e CO (World Health Organization, 2021), portanto, normas foram criadas com o intuito regulamentar e quantificar esses poluentes. Em 1970, de forma pioneira, a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) estabeleceu padrões de qualidade de ar e, como consequência, grupos de poluentes com maior potencial de perigo foram estabelecidos (AGENCY, n.d.). No Brasil, o controle de poluentes atmosféricos é regido pela resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) N° 491/2018 (BRASIL, 2018a). A Tabela 1 mostra os limites atuais para controle da qualidade do ar no Brasil.

Tabela 1 – Limites definidos pelo CONAMA

Poluente	**Limite Máximo ($\mu g/m^3$)**	**Período de Amostragem**
Material Particulado (MP_{10})	50	24 horas
Material Particulado ($MP_{2,5}$)	25	24 horas
Dióxido de Enxofre (SO_2)	20	24 hora
Óxido de Nitrogênio (NO_2)	200	1 hora
Ozônio (O_3)	100	8 horas

Fonte: Adaptado de Brasil (2018a)

Quando se trata de emissões veiculares, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) e o Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT) desempenham papéis fundamentais no controle

da poluição no ar atmosférico. O PROCONVE é responsável por regulamentar as emissões de veículos como automóveis, caminhões, ônibus e similares através da resolução CONAMA Nª 18/1986 (BRASIL, 1986). Já o PROMOT se encarrega das normas de emissões para motocicletas e veículos afins através da resolução CONAMA Nª 297/2002 (BRASIL, 2002). Com relação aos veículos automotores, a Tabela 2 mostra os limites definidos para emissões veiculares em vigor a partir de 2019.

Tabela 2 – Proconve L7.

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

Fonte: Adaptado de Brasil (2018b)

Na tabela são estabelecidos limites rigorosos para as emissões de poluentes em diferentes categorias de veículos. Os veículos leves de passageiros, por exemplo, apresentam um limite de 80 mg/km para Gases Orgânicos Não Metano (NMOG) + NO_x e 1000 mg/km para CO, refletindo a necessidade de redução das emissões para melhorar a qualidade do ar. Já os veículos leves comerciais têm limites que variam, sendo 140 mg/km e 320 mg/km para NMOG + NO_x, o que demonstra a flexibilidade regulatória em função da categoria do veículo. Além disso, a tabela inclui parâmetros para emissões evaporativas e durante o abastecimento, evidenciando uma abordagem abrangente na regulamentação, visando não apenas o controle das emissões durante a operação, mas também no ciclo de vida do veículo. Esse conjunto de normas representa um avanço significativo na legislação ambiental brasileira, promovendo um compromisso com a sustentabilidade e a saúde pública.

3.0.1.1 Óxidos de nitrogênio

A formação do NO_x em processos de combustão resulta da oxidação do nitrogênio molecular presente no ar, mediada por espécies atômicas e radicais geradas em altas temperaturas (GLARBORG *et al.*, 2018). Esse processo, conhecido como mecanismo térmico de Zeldovich, é dominado por reações em cadeia envolvendo oxigênio atômico e radicais hidroxila, com produção de NO_x proporcional à temperatura da chama. Condições de combustão pobre amplificam a formação de NO_x ao aumentar a disponibilidade de oxigênio molecular. Embora a Equação 3.1 represente o equilíbrio global, a formação de óxido nítrico é termodinamicamente desfavorecida em condições atmosféricas, exigindo altas temperaturas para romper a ligação do nitrogênio molecular.

$$N_2 + O_2 \rightleftharpoons 2NO \tag{3.1}$$

Ao contrário do que se pode pensar, a formação de NO_x não ocorre devido à reação direta do oxigênio molecular com o nitrogênio molecular em condições atmosféricas. Em vez disso, ela resulta principalmente das reações entre o oxigênio atômico, formado por dissociação térmica em altas temperaturas, e o nitrogênio molecular, através do mecanismo reacional conhecido como mecanismo estendido de Zeldovich ou NO_x térmico. As equações 3.2, 3.3 e 3.4, originalmente propostas por Zeldovich e posteriormente ampliadas por Lavoie e colaboradores, descrevem as reações elementares que governam a formação de NO_x em misturas quase-estequiométricas.

$$N_2 + O \rightleftharpoons NO + N \tag{3.2}$$

$$N + O_2 \rightleftharpoons NO + O \tag{3.3}$$

$$N + OH \rightleftharpoons NO + H \tag{3.4}$$

É importante destacar que uma parcela significativa do NO_x térmico é gerada na região pós-chama. Como demonstrado por **??**), a Equação 3.2 apresenta uma taxa de reação notavelmente mais lenta que as reações de combustão principais, com alta energia de ativação. Essa elevada barreira energética confere ao processo uma dependência exponencial com a temperatura, característica intrínseca do mecanismo de Zeldovich.

3.0.1.2 Monóxido de carbono

O monóxido de carbono é um gás tóxico, mesmo sendo incolor e inodoro. A exposição a concentrações elevadas desse gás pode causar tonturas e, em casos extremos, levar à asfixia e até mesmo à morte. A formação do CO durante a combustão está diretamente relacionada à estequiometria do processo (HEYWOOD, 2018). Em situações de excesso de combustível, como quando é exigida mais potência do motor ou durante a fase inicial de funcionamento quando o motor está frio, a produção de monóxido de carbono é amplificada (SODRE, 2000). Isso ocorre devido à falta oxigênio molecular disponível para oxidar completamente todo o

carbono presente no combustível. Em termos gerais, o processo de combustão de hidrocarbonetos pode ser dividido em duas etapas distintas: decomposição do combustível e oxidação do CO.

Primeiramente, ocorre a decomposição do combustível para formar CO. Nesta fase inicial, as moléculas de hidrocarbonetos são quebradas e liberam CO como um subproduto. Em seguida, há a etapa de oxidação do monóxido de carbono para CO_2. Durante essa fase, o CO reage com moléculas de oxigênio molecular disponíveis no ambiente para formar o CO_2. As equações 3.5 e 3.6 representam as principais reações presentes no mecanismo reacional de CO.

$$CO + O_2 \rightleftharpoons CO_2 + O \tag{3.5}$$

$$CO + OH \rightleftharpoons CO_2 + H \tag{3.6}$$

A presença de oxigênio na região onde ocorre a reação química é crucial para iniciar o processo de oxidação do monóxido de carbono. Além da complexidade da parte química envolvida, é essencial que a mistura entre os reagentes seja altamente eficiente, garantindo a conversão completa do CO em CO_2. Essa mistura intensa é especialmente relevante em situações onde há um moderado excesso de oxidante, pois a eficácia da conversão do CO depende diretamente da homogeneidade da mistura de gases (CERCIELLO, 1995).

3.0.2 Combustão avançada

O sistema de combustão em baixa temperatura é uma forma de motores entrarem em ignição com combustão fria, tentando, assim, evitar temperaturas mais elevadas e consequentemente a formação de maiores taxas de NO_x. Para tanto, novos conceitos em motores começaram a ser pensados e desenvolvidos, as principais estratégias conhecidas são a HCCI, *Premixed Charged Compression Ignition* (PCCI), *Reactivity Controlled Compression Ignition* (RCCI) e *Direct Dual Fuel Stratification* (DDFS) (SHIRVANI *et al.*, 2021). Em especial, a tecnologia HCCI tem ganhado mais atenção e tem sido aprimorada ao longo do tempo.

Em 1979, Onishi *et al.* (1979) introduziram o conceito de Combustão Homogênea por Compressão Interna (HCCI), que, conforme o nome sugere, envolve a injeção de uma mistura homogênea de ar e combustível na câmara de combustão. Neste processo, a ignição ocorre devido à compressão da mistura ar-combustível, incorporando, assim, elementos das configurações presentes nos motores Otto e Diesel convencionais. Uma característica distintiva do modo de operação HCCI é a rápida adição de calor durante o ciclo de compressão, o que complica ainda

mais o controle do processo de ignição. Essa dinâmica resulta em desafios significativos na regulação do tempo de ignição e na manutenção da estabilidade do funcionamento do motor, além de influenciar diretamente as emissões e a eficiência do sistema.

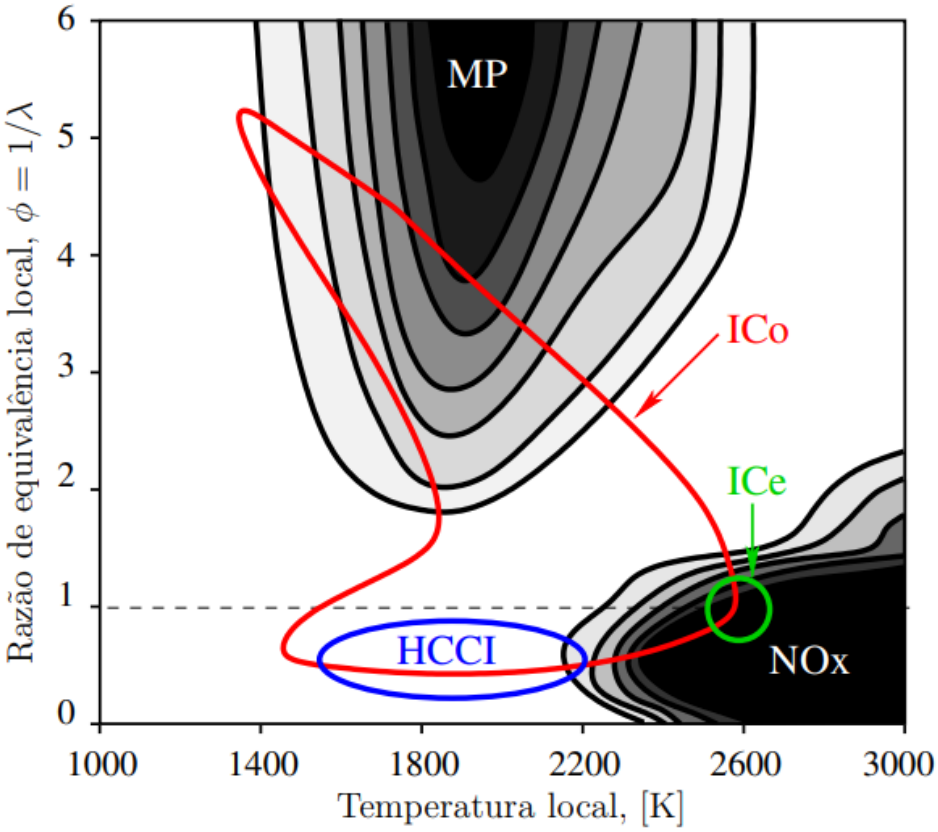
A tecnologia de combustão HCCI oferece um avanço notável em eficiência térmica e redução de emissões, já que a mistura de ar e combustível é queimada simultaneamente no cilindro. Isso permite uma combustão mais completa com menor uso de combustível e menores emissões de poluentes, como NO_x, que normalmente se formam em temperaturas acima de 1800 K (ZHAO, 2007). O regime de combustão em alta velocidade típico da HCCI assemelha-se termodinamicamente a um processo de combustão com volume constante, resultando em maior eficiência termodinâmica devido à significativa redução das perdas térmicas pelas paredes da câmara de combustão (SHARMA *et al.*, 2015).

Devido a baixa temperatura na combustão, esse motor emite quantidades extremamente baixas, praticamente nulas, de óxido de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP) (GHAREHGHANI *et al.*, 2021). A Figura 1 ilustra as diferenças nas emissões associadas a essas configurações de motores, evidenciando que, no modo de operação HCCI, as emissões são significativamente reduzidas quando comparadas às emissões de outras tecnologias, como os motores de combustão interna convencionais (Ignição por Centelha (ICe) e Ignição por Compressão (ICo)). Essa redução nas emissões representa um avanço considerável em direção à sustentabilidade e à eficiência energética dos sistemas de propulsão veicular.

Apesar dos benefícios, a tecnologia HCCI enfrenta desafios, incluindo uma faixa operacional limitada, riscos de detonação e falhas de ignição, além de altas emissões de CO(ÇELEBI *et al.*, 2023). No entanto, o uso de etanol pode atenuar alguns desses problemas. O etanol, com seu elevado número de octanas e propriedades antidetonantes, além do alto calor latente de vaporização, facilita uma combustão mais eficiente e menos propensa à detonação, permitindo uma mistura de ar e combustível mais densa e favorecendo a combustão pobre (MAURYA; AGARWAL, 2011).

Um dos principais desafios nesta configuração é o controle limitado sobre a ignição, que ocorre principalmente pela falta de um mecanismo direto para o acionamento da ignição. Dessa forma, o sistema depende apenas das propriedades do fluido na câmara de combustão, resultando em variações de ciclo a ciclo. O controle do momento de ignição neste tipo de motor tem se mostrado um problema complexo, conforme destacado em estudos recentes (CHAUDHARI; DESHMUKH, 2019). Essa complexidade ressalta a importância da implementação de um

Figura 1 – Comparativo de emissões dos motores.



Fonte: Adaptado de Duan *et al.* (2021)

sistema de controle destinado a monitorar e avaliar as propriedades dos fluidos que entram.

3.1 Propulsão alternativa a combustão

Os veículos elétricos (VEs) são automóveis que utilizam motores elétricos para propulsão, sendo alimentados por baterias recarregáveis conectadas a fontes externas de energia (Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2013). Uma das principais vantagens desses veículos é a ausência de emissões de gases poluentes, uma vez que operam exclusivamente com eletricidade.

3.1.1 Veículos elétricos a bateria

Os veículos elétricos a bateria são exclusivamente movidos por motores elétricos, sem a presença de MCI. Eles dependem de baterias para armazenar a energia elétrica, que é majoritariamente proveniente da rede elétrica. Esses veículos são ideais para percursos curtos, especialmente em áreas urbanas (YONG *et al.*, 2015). O carregamento das baterias pode ser feito em tomadas comuns, mas para uma recarga rápida é necessária uma infraestrutura elétrica

mais robusta (ARIOLI, 2016).

3.1.2 Veículos elétricos híbridos

Os veículos elétricos híbridos combinam motores de combustão interna com motores elétricos para propulsão. Geralmente, eles possuem baterias de menor capacidade que são recarregadas por sistemas de frenagem regenerativa ou pelo próprio MCI, sem possibilidade de recarga na rede elétrica. As configurações mais comuns incluem o sistema Série, onde a energia flui apenas por um caminho, e o sistema Paralelo, que permite o fluxo de energia por duas fontes simultaneamente, proporcionando maior eficiência (TIE; TAN, 2013; BARAN, 2012). O sistema Série-Paralelo combina as características dos dois anteriores, otimizando o uso do MCI enquanto recarrega a bateria, mas é mais complexo e custoso (YONG *et al.*, 2015).

Os veículos elétricos híbridos *Plug-in* são uma variação dos dos veículos híbridos, possuindo a capacidade de serem recarregados pela rede elétrica. Eles têm baterias maiores, permitindo uma maior autonomia elétrica (YONG *et al.*, 2015). Assim como os hibridos convencionais, essa versão pode ser dividida em três tipos: Série, Paralelo e Série-Paralelo, com modos de operação que otimizam o desempenho e minimizam o impacto ambiental (BRADLEY; FRANK, 2009). Os modos de gerenciamento de energia incluem o Modo Carga Sustentada, o Modo Decaimento de Carga, o Modo Veículo Elétrico e o Modo Motor de Combustão Interna (EPRI - Electric Power Research Institute, 2001).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais e métodos que auxiliaram e foram utilizados ao longo do desenvolvimento desse trabalho,

4.1 Motor em estudo

O presente estudo concentra-se no motor BR10, amplamente utilizado nos veículos Sandero, Logan e Kwid. Uma das características distintivas do BR10 é sua capacidade de operar com diferentes combustíveis, incluindo etanol, o que não apenas melhora o desempenho, mas também contribui para a redução das emissões de gases poluentes. O design do motor permite uma combustão mais eficiente, resultando em menor consumo de combustível e, consequentemente, uma pegada ambiental reduzida. A Tabela 3 apresenta as especificações técnicas do motor BR10, fornecendo informações detalhadas sobre suas características e desempenho.

Tabela 3 – Especificação do BR10

Potência máxima de frenagem (cv)	82
Número de cilindros	3
Deslocamento (cm^3)	999
Diâmetro/curso do cilindro (m)	0,071/0,0841
Taxa de compressão	12:1

Fonte: Adaptado de Renault (2023)

O BR10 será analisado de forma detalhada, com o intuito de mapear suas curvas de desempenho, abrangendo parâmetros essenciais como torque, consumo específico de combustível, emissões de gases poluentes como CO, CO_2, NO_x e HC. Essas curvas serão obtidas por meio de ensaios experimentais em dinamômetro de bancada, de forma a garantir a precisão dos dados coletados. O processo de mapeamento do motor BR10 permitirá uma compreensão aprofundada de suas características operacionais, fornecendo uma base sólida para a modelagem numérica e posterior validação das simulações realizadas no software IGNITE. O ciclo FTP-75 será utilizado como referência para avaliar o comportamento do motor em condições reais de condução, com foco em situações de tráfego urbano e suas implicações no consumo de combustível e nas emissões.

Além disso, este trabalho propõe a implementação de modificações no modo de combustão do motor BR10, com o objetivo de explorar o potencial de tecnologias avançadas, como a HCCI. A introdução desse novo modo de combustão será estudada em termos de sua

eficiência energética e sua capacidade de reduzir significativamente a emissão de poluentes. Para tanto, o mapa do motor original será substituído pelo mapa do motor HCCI, mantendo as mesmas condições operacionais do ciclo de teste, a fim de comparar os resultados de forma precisa. Essa abordagem permite não apenas validar o comportamento do motor BR10 em sua configuração original, mas também identificar melhorias potenciais através de novas estratégias de combustão, alinhando o motor às exigências ambientais cada vez mais rigorosas.

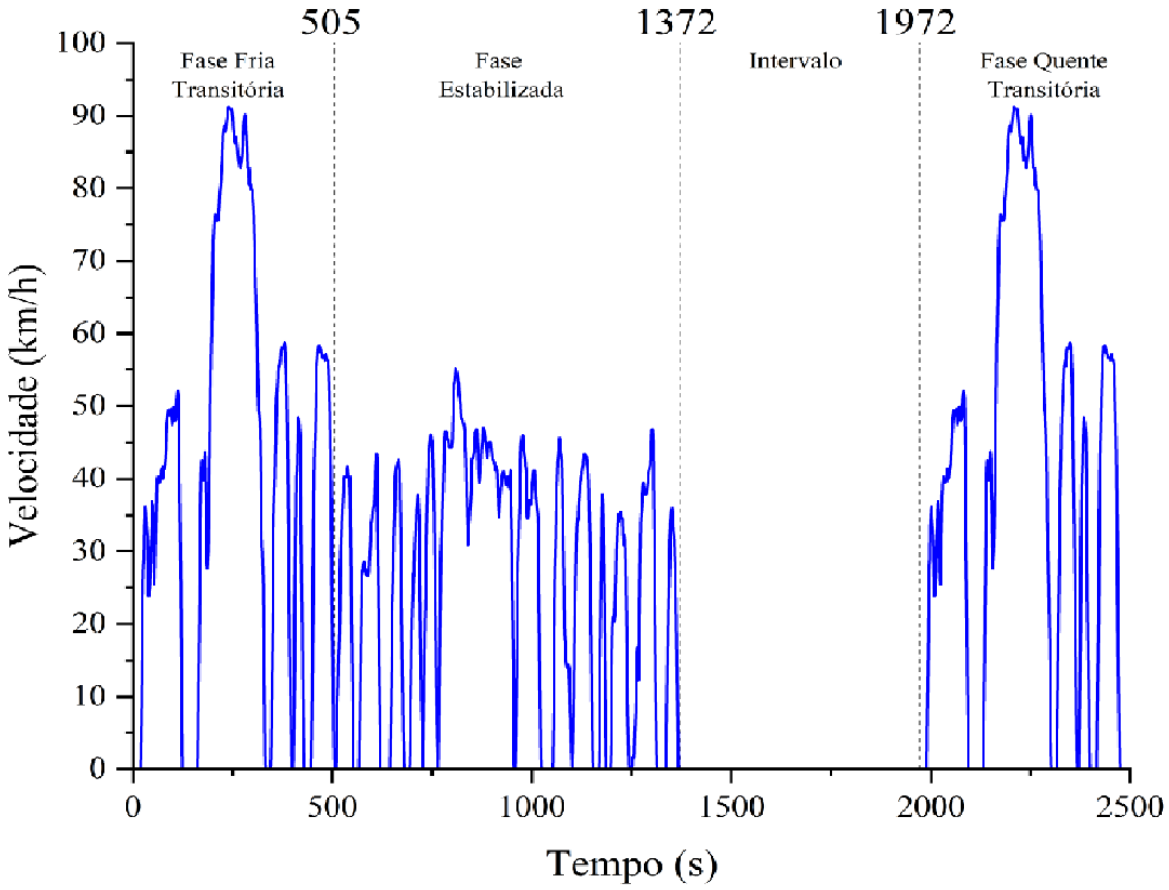
4.2 Ensaio dinamométrico

O mapeamento do motor foi realizado por meio de uma bancada dinamométrica, um dispositivo fundamental para a avaliação do desempenho de motores. Esse tipo de ensaio permite que o motor seja submetido a diversas condições operacionais, como variações de carga, rotação e temperatura, possibilitando a coleta de dados precisos sobre o comportamento do motor em diferentes situações. Durante o mapeamento, variáveis como torque, potência e eficiência foram medidas em um espectro amplo de condições, garantindo a obtenção de um perfil detalhado do desempenho do motor. Os dados coletados durante esses testes foram analisados e, posteriormente, disponibilizados para análise no Laboratório de Hidrogênio e Máquinas Térmicas (LHMT).

Complementando essa fase de mapeamento, o ensaio no ciclo de condução FTP-75 também foi conduzido utilizando um dinamômetro de rolos. Esse equipamento é projetado para simular as condições de operação de um veículo em movimento, permitindo que o motor seja testado em um ambiente que reproduz as características do tráfego urbano e rodoviário. Durante o ensaio, o dinamômetro registra dados sobre a eficiência do motor, o consumo de combustível e as emissões de poluentes em resposta a diferentes perfis de aceleração e desaceleração. A Figura 2 ilustra o perfil de velocidade para o ciclo FTP-75.

Os resultados desse ensaio, assim como os dados obtidos durante o mapeamento em bancada, foram repassados para a análise do LHMT. Essa troca de informações é interessante, pois permite uma avaliação mais abrangente e fundamentada sobre o desempenho do motor. A combinação do mapeamento em bancada com os ensaios dinâmicos no ciclo FTP-75 proporciona uma compreensão aprofundada do funcionamento do motor, facilitando a identificação de oportunidades de otimização e a validação de novas configurações de propulsão. Essa abordagem integrada é essencial para o avanço das tecnologias de motores e para o desenvolvimento de soluções que atendam às crescentes demandas por eficiência energética e redução de emissões.

Figura 2 – Ciclo FTP-75

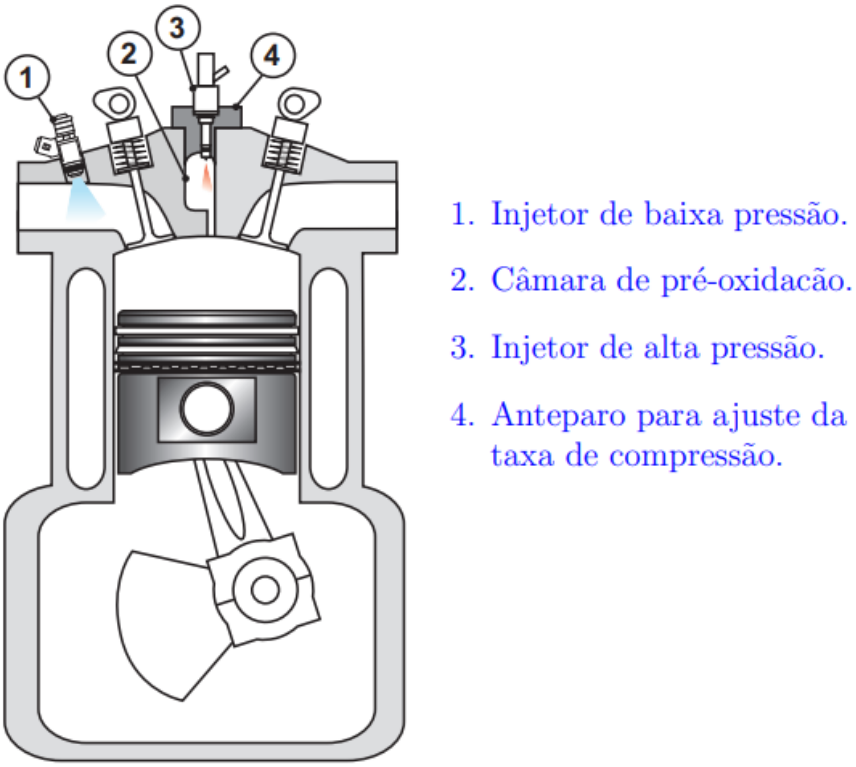


Fonte: Autor (2024)

4.3 Modo de operação HCCI

O estudo do modo de combustão HCCI foi realizado em um motor de teste com configuração específica para atuar nesse tipo de combustão, um modelo multi cilindro, montado em uma bancada dinamométrica. Nesse experimento, um dos cilindros foi modificado para operar no regime HCCI, enquanto os demais cilindros continuaram a operar em modo convencional, desempenhando o papel crucial de estabilização do momento de ignição do cilindro HCCI, Essa abordagem híbrida foi adotada com o objetivo de compreender as peculiaridades do regime HCCI em condições controladas, além de explorar as possibilidades de integração dessa tecnologia em um motor embarcado. A combustão HCCI, devido à sua característica de autoignição homogênea, exige um controle extremamente preciso, uma vez que a ignição é influenciada por parâmetros como temperatura e pressão da mistura ar-combustível, sem a necessidade de uma faísca tradicional. A Figura 3 mostra a configuração presente na câmara de combustão HCCI proposta no experimento.

Figura 3 – Configuração da câmara de combustão HCCI



Fonte: Autor (2024)

A Figura 3 inclui um injetor de baixa pressão, uma antecâmara de oxidação, um injetor de alta pressão e um anteparo para ajuste da taxa de compressão. A antecâmara de pré-oxidação tem a função de atingir temperaturas elevadas que favoreçam a ignição do etanol, todavia, para garantir o alcance das condições térmicas necessárias na antecâmara, é adotada a estratégia de cruzamento negativo de válvulas. Esta estratégia consiste no fechamento antecipado das válvulas de escape enquanto o pistão ainda se move em direção ao ponto morto superior, e na abertura das válvulas de admissão apenas quando o pistão já estiver se deslocando para o ponto morto inferior. Como resultado, uma fração dos gases de exaustão fica aprisionada no cilindro, configurando um ciclo de recirculação interna de gases de exaustão.

No processo, uma quantidade controlada de combustível é injetada na antecâmara, formando uma mistura ligeiramente rica, que é então pré-oxidada devido às altas temperaturas e à recompressão dos gases na antecâmara. O restante do combustível é injetado na porta da válvula de admissão, formando uma mistura empobrecida com o ar. Essas condições promovem uma combustão eficiente, com alta eficiência térmica e baixas emissões. O anteparo para ajuste da taxa de compressão é utilizado para controlar a compressão no cilindro, visando melhorar a ignição e melhorar a performance do processo de combustão.

Para que essa tecnologia possa ser aplicada em motores utilizados em ensaios de

ciclos de condução é imprescindível o uso de um sistema de controle eletrônico avançado. Esse sistema deve ser capaz de gerenciar as flutuações da ignição entre os ciclos de combustão de forma estável e segura. Isso se dá porque a combustão HCCI, diferentemente da combustão convencional, pode sofrer com variações indesejadas no momento de ignição, impactando diretamente a eficiência do motor e a emissão de poluentes. Assim, é necessária a adoção de estratégias que permitam a estabilização do regime HCCI, garantindo que o motor opere dentro de um intervalo de parâmetros que otimize a eficiência e mantenha baixos níveis de emissões.

Com o intuito de avaliar o comportamento do motor de teste tanto no modo convencional quanto no modo HCCI, foram realizadas curvas de desempenho e emissão para ambos os regimes operacionais. As curvas obtidas 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 emissão entre os modos convencional e HCCI serão, então, aplicadas ao motor BR10 da Renault com o objetivo de prever seu comportamento em cenários futuros, quando configurado para operar com a tecnologia HCCI.

O processo de mapeamento do motor BR10, que inclui o desenvolvimento de mapas de desempenho, consumo de combustível e emissões para o regime HCCI, é essencial para prever como esse motor pode operar em condições de baixas cargas e rotações. O regime HCCI, quando aplicado ao BR10, possui potencial de trazer benefícios significativos em termos de eficiência energética e redução de emissões, reforçando, assim, a relevância de investir no estudo de técnicas de combustão avançada para motores. A análise detalhada do comportamento do motor sob diferentes regimes operacionais fornece subsídios importantes para o desenvolvimento de motores mais eficientes e ambientalmente sustentáveis.

4.4 Ciclo de condução

O IGNITE, da Realis Simulation, foi utilizado para realizar simulações detalhadas com foco na avaliação do consumo de combustível e das emissões geradas pelo Renault Sandero, equipado com o motor BR10, durante o ciclo de condução FTP-75. O ciclo FTP-75 é amplamente adotado para medir o desempenho ambiental dos veículos, já que simula as condições reais de tráfego urbano, incluindo acelerações, desacelerações e paradas frequentes, que são características típicas do uso diário em cidades.

Diferentemente de uma simulação que inclui a modelagem completa do motor de

combustão interna, o IGNITE foi utilizado para trabalhar com mapas de performance previamente desenvolvidos. Esses mapas, que englobam dados como consumo de combustível, emissões de NO_x, emissões de CO, emissões de HC e desempenho, foram inseridos diretamente no software, evitando a necessidade de modelar cada detalhe do ciclo de combustão interna. Dessa forma, o IGNITE funciona como uma plataforma de integração nesse trabalho, onde os mapas de performance já existentes foram aplicados para simular o comportamento do veículo às variações de carga, aceleração e frenagem presentes no ciclo FTP-75. Essa abordagem permite que as simulações consigam ser mais rápidas e precisas, concentrando-se nos resultados finais de consumo e emissões, sem a complexidade adicional de simular o motor em nível detalhado dentro de algum outro pacote da Realis Simulation.

As simulações foram conduzidas utilizando duas configurações distintas de veículos, todas baseadas no modelo Renault Sandero, com variações restritas aos elementos do *powertrain*, visando avaliar o impacto de diferentes tecnologias no desempenho ambiental. A primeira configuração analisada consistiu no Renault Sandero equipado com um motor de combustão interna convencional e depois um HCCI, cujos mapas correspondentes a essa configuração foram elaborados a partir de experimentos realizados com o motor de teste, operando com combustível E100. O objetivo principal desta simulação de ciclo de condução foi validar o modelo numérico com dados empíricos, possibilitando, assim, a realização de ajustes e modificações no *powertrain* nas demais configurações.

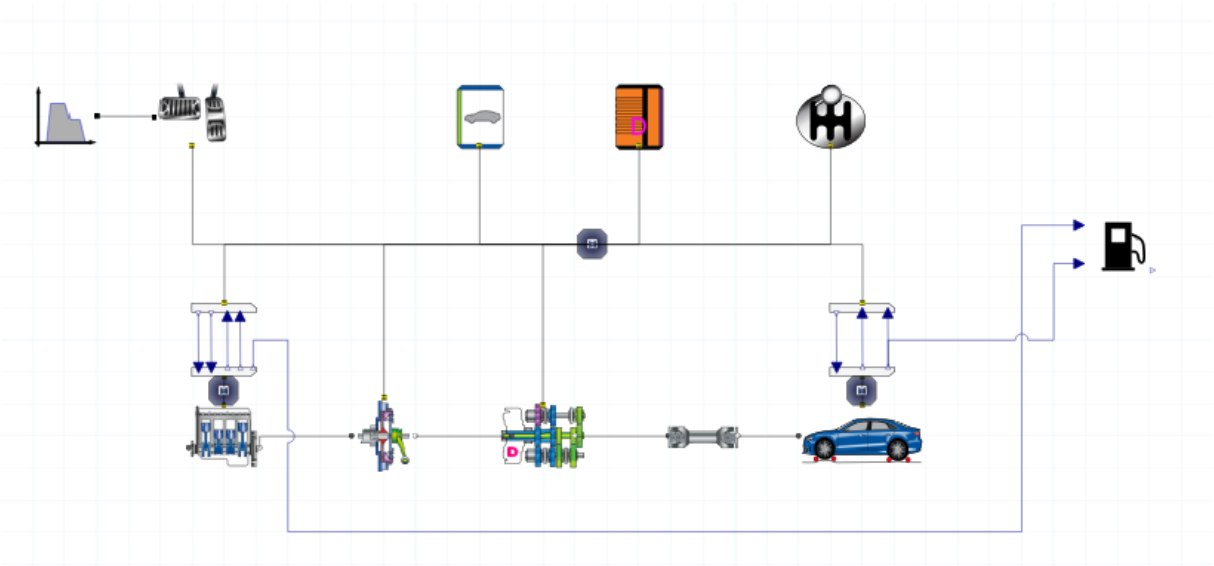
A segunda configuração consistiu em um veículo híbrido, que foi testado inicialmente com um motor BR10 convencional e, posteriormente, com um motor BR10 HCCI no Renault Sandero. O objetivo dessa configuração foi reduzir as emissões e o consumo de combustível, permitindo examinar o desempenho do veículo em um cenário híbrido, onde a interação entre o motor a combustão e o motor elétrico influencia diretamente o consumo de combustível e as emissões.

4.4.1 Powertrain convencional

As duas primeiras configurações de veículos possuem diferenças mínimas entre si, sendo a única distinção o tipo de motor empregado em seus respectivos sistemas de propulsão. O restante dos componentes do *powertrain*, incluindo transmissão, eixos e outros sistemas auxiliares, permanecem idênticos em ambas as variações. Essa abordagem permite uma análise detalhada do impacto isolado do motor sobre o desempenho veicular e as emissões. A Figura

4 ilustra o modelo computacional empregado para a simulação dessas duas configurações, no qual o motor influencia diretamente o comportamento dinâmico e os parâmetros ambientais analisados. A precisão do modelo reflete a capacidade de replicar condições reais de operação, sendo vital para a validação dos resultados.

Figura 4 – Veículo convencional simulado no IGNITE



Fonte: Autor (2024)

O modelo computacional desenvolvido é composto por onze componentes distintos, cada um com funções específicas relacionadas ao controle e à operação do veículo. Esses componentes são responsáveis por regular aspectos fundamentais do comportamento dinâmico do veículo, como aceleração, desaceleração, frenagem e a troca de marchas, garantindo uma simulação precisa e alinhada às condições reais de condução. De maneira geral, esses componentes podem ser divididos em duas grandes categorias: o primeiro grupo é formado por blocos pertencentes ao sistema de *powertrain*, responsáveis por simular o desempenho do motor, transmissão e demais elementos relacionados à propulsão do veículo. O segundo grupo compreende os blocos que compõem o sistema de controle geral, encarregados de gerenciar o comportamento global do veículo e sua resposta às condições impostas pelo ciclo de condução.

Apesar dessa divisão clara entre os sistemas de *powertrain* e de controle, há um componente adicional no modelo que merece destaque, o bloco denominado '*FuelConsumption*'. Esse bloco, embora esteja intimamente relacionado ao desempenho do motor e ao consumo energético do veículo, não pode ser classificado estritamente como pertencente a um dos dois grupos anteriores. Sua função é monitorar e calcular, de forma precisa, o consumo de combustível ao

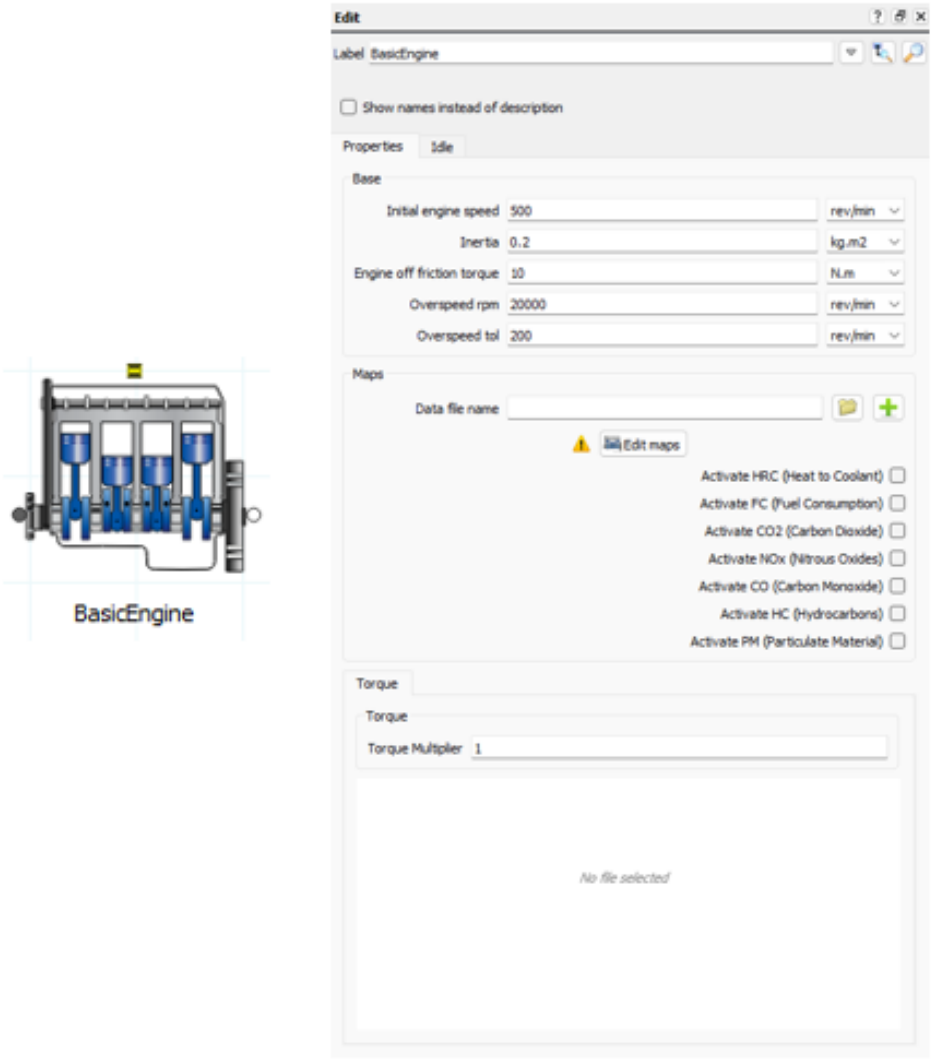
longo de diferentes fases da condução, sem estar diretamente vinculado às dinâmicas de controle ou de propulsão. Dessa forma, o modelo desenvolvido é altamente modular, permitindo uma análise detalhada e segmentada dos principais aspectos que influenciam a eficiência energética e o desempenho ambiental do veículo.

Quanto à definição dos parâmetros configurados no modelo computacional, será realizada uma abordagem detalhada de dois componentes principais, cuja complexidade e importância no desempenho do sistema exigem uma análise mais minuciosa. Esses componentes desempenham papéis cruciais na precisão e eficácia da simulação, sendo, portanto, essenciais para a compreensão do comportamento dinâmico do veículo sob diferentes condições operacionais. Os demais componentes, por apresentarem uma estrutura mais simples e um papel menos complexo no contexto geral do modelo, serão discutidos de forma mais generalista. Embora desempenhem funções importantes no funcionamento global do sistema, sua operação é mais direta e, por isso, não requer uma análise tão aprofundada quanto os componentes de maior relevância. Essa abordagem permitirá um equilíbrio adequado entre profundidade técnica e clareza, garantindo que os aspectos críticos do modelo sejam devidamente compreendidos, sem comprometer a concisão da apresentação dos componentes mais simples. A Figura 5 mostra a interface do software com bloco '*BasicEngine*' em destaque.

O componente '*BasicEngine*' representa um modelo de motor simplificado, projetado para receber e processar mapas detalhados que regulam seu desempenho. Estes mapas incluem informações essenciais como torque, consumo específico de combustível, e emissões de poluentes, tais como NO_x, CO, HC e CO_2. Além disso, o modelo permite a inserção de parâmetros críticos como a inércia do virabrequim, a rotação inicial e a rotação máxima permitida, parâmetros estes que podem ser obtidos diretamente da montadora do veículo, garantindo maior precisão nas simulações. Os mapas de entrada que alimentam o '*BasicEngine*' foram desenvolvidos com base nos ensaios experimentais realizados em dinamômetros de bancada. Durante esses ensaios, foram coletados dados abrangendo uma ampla gama de condições operacionais, como diferentes cargas, torques e rotações do motor. A partir dessas informações, foram construídos os mapas necessários para alimentar o modelo, garantindo uma correspondência precisa entre o comportamento simulado e o desempenho real do motor em condições operacionais variadas. A Figura 6 mostra a interface do software com o componente '*GearBox*' em destaque.

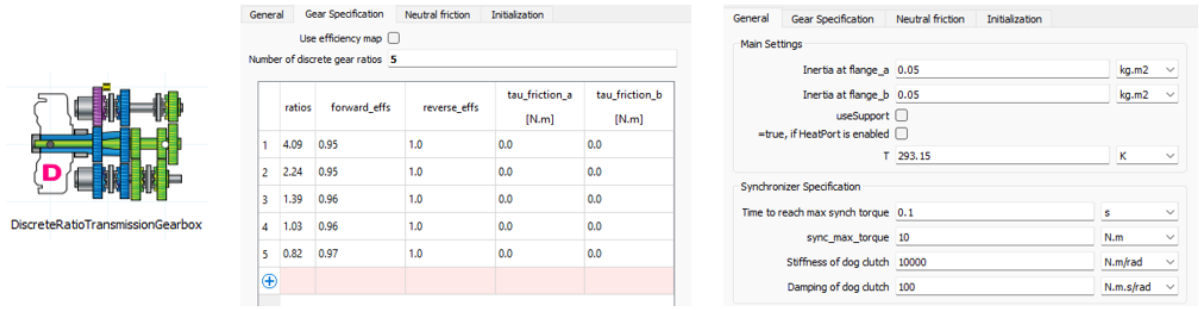
O bloco '*GearBox*' no modelo numérico é responsável pela representação da caixa de transmissão, reunindo informações cruciais sobre as relações de redução para cada marcha,

Figura 5 – Componente '*BasicEngine*' do IGNITE



Fonte: Autor (2024)

Figura 6 – Componente '*GearBox*' do IGNITE



Fonte: Autor (2024)

eficiência de transmissão e inércia dos elementos do sistema. Além dessas propriedades mecânicas, o controlador do '*GearBox*' integra um mapa de troca de marchas, onde são estabelecidas

as rotações específicas para que as mudanças ascendentes e descendentes de marcha sejam realizadas. Esse mapa de trocas foi construído com base em dados experimentais obtidos por meio de testes em dinamômetro de chassi. Durante esses ensaios, foi possível identificar as rotações associadas a cada marcha em diferentes velocidades. A partir dessa análise detalhada, foi possível compilar os dados necessários e elaborar a planilha que define os pontos ideais para a troca de marchas. A Tabela 4 mostra os demais parâmetros definidos na modelagem do veículo.

Tabela 4 – Demais parâmetros definidos no modelo convencional e de combustão avançada

Massa do veículo (kg)	1100
Raio da roda (m)	0,31
Relação de redução final (-)	4,93
Máxima força de frenagem (N)	1000
Velocidade inicial do motor (RPM)	0
Inércia (kg/m^2)	0,12
Torque de fricção do motor (N.m)	15
Sobrevelocidade (RPM)	6000
Tolerância a sobrevelocidade (RPM)	50
Diferencial (-)	4,93:1
Coeficiente de arrasto (-)	0,3
Torque máximo @ 3500 RPM (kgf.m)	10,5
Área frontral (m$_2$)	2,26
Área frontal corrigida (m^2)	0,678

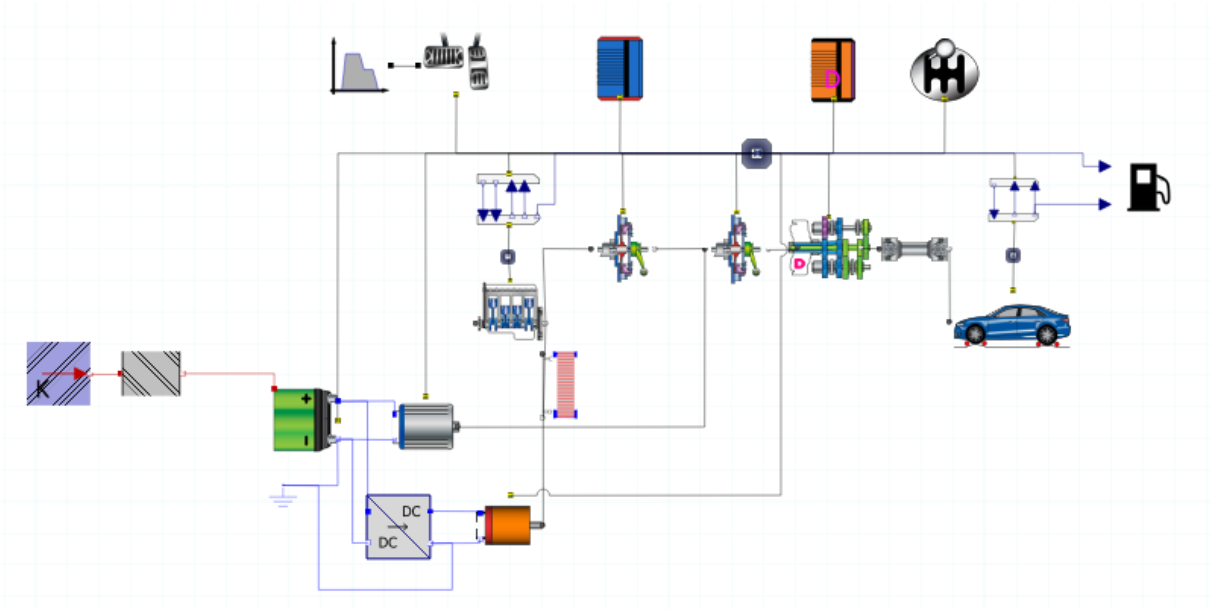
Fonte: Adaptado de Renault (2023)

Para proceder à validação do modelo numérico e, posteriormente, realizar as modificações necessárias, o modelo convencional, sem alterações, será inicialmente utilizado como referência. O ciclo de condução FTP-75 será aplicado com o intuito de comparar os resultados do modelo numérico desenvolvido com os dados experimentais obtidos nos testes no dinamômetro de rolos, garantindo, assim, a precisão e a confiabilidade do experimento. Concluída a fase de validação com o motor convencional, será realizada a substituição do mapa de desempenho desse motor pelo mapa correspondente ao motor HCCI, com vistas a aplicar o mesmo ciclo de condução FTP-75, agora sob as novas condições de operação. Esse processo permitirá a análise detalhada das diferenças no comportamento do motor e das emissões geradas, buscando entender a eficiência e as características desse modo de operação em comparação ao motor convencional validado.

4.4.2 Powertrain híbrido

Com a validação do modelo numérico, a configuração mais sofisticada a ser analisada consiste na hibridização do veículo. Nesta configuração, os motores operam em paralelo, sendo um elétrico e o outro a combustão interna. Essa abordagem inovadora possibilita a obtenção de curvas de consumo mais favoráveis e uma entrega de torque significativamente elevada. Contudo, essa vantagem em termos de desempenho é acompanhada por uma maior complexidade tanto na construção do sistema quanto na modelagem computacional, exigindo uma análise minuciosa dos componentes e das interações entre os dois tipos de motorização. A hibridização não apenas melhora a eficiência energética, mas também demanda um aprofundamento nas técnicas de controle e integração dos sistemas, tornando-se um desafio empolgante para a engenharia automotiva contemporânea. A Figura 7 mostra o modelo computacional empregado para a simulação dessa configuração.

Figura 7 – Veículo híbrido simulado no IGNITE



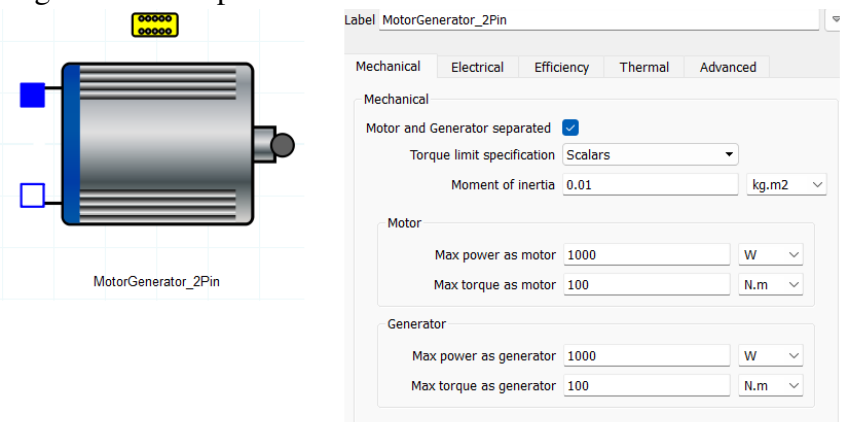
Fonte: Autor (2024)

O modelo computacional criado é composto por um conjunto de dezenove elementos distintos, cada um desempenhando papéis específicos no controle e na operação do veículo. Esses elementos são responsáveis por regular diversos parâmetros essenciais, como a aceleração, a desaceleração, o sistema de frenagem e a gestão das trocas de marcha, garantindo que a simulação reproduza fielmente as condições reais de condução, igualmente ao modelo anterior. Esses componentes também podem ser organizados em dois grupos principais: o primeiro refere-

se aos blocos que simulam o *powertrain*, incluindo motores, transmissão e demais sistemas relacionados à geração de força motriz. O segundo grupo consiste nos blocos que se ocupam do controle geral do veículo, os quais são responsáveis por gerenciar de forma complexa o comportamento do automóvel, especialmente no contexto de propulsão híbrida. Nesse cenário, a interação entre o motor a combustão e o motor elétrico requer um sistema de controle sofisticado, capaz de ajustar dinamicamente a distribuição de potência e a resposta do veículo às variações impostas pelo ciclo de condução simulado.

No que diz respeito à definição dos parâmetros configurados no modelo computacional, será feita uma análise um pouco mais aprofundada de 2 novos componentes principais no modelo, cujas complexidades e papéis cruciais no desempenho do sistema demandam uma investigação detalhada. Os outros componentes, devido à sua estrutura mais simples e funções menos sofisticadas dentro do contexto geral do modelo, serão abordados de maneira mais superficial. Embora sejam essenciais para o funcionamento global do sistema, suas operações são mais diretas e não exigem a mesma profundidade de análise que os componentes mais significativos. Essa estratégia de abordagem permitirá uma harmonia entre a profundidade técnica e a clareza, assegurando que os elementos críticos do modelo sejam adequadamente destacados, sem sacrificar a concisão na apresentação dos componentes de menor complexidade. A Figura 8 mostra a interface do software com bloco '*MotorGenerator*' em destaque.

Figura 8 – Componente '*MotorGenerator*' do IGNITE

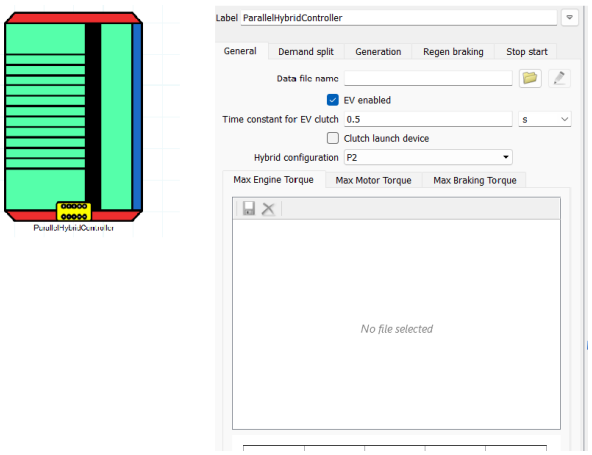


Fonte: Autor (2024)

O bloco '*MotorGenerator*' no modelo numérico é fundamental para a propulsão elétrica do sistema híbrido, desempenhando um papel crucial na conversão de energia elétrica em movimento. Este componente é alimentado por uma bateria que armazena energia elétrica, a qual é carregada durante os momentos de frenagem regenerativa. Durante a desaceleração, a energia

cinética do veículo é convertida em energia elétrica e transferida para a bateria, otimizando a eficiência energética do sistema. O '*MotorGenerator*' também é responsável por fornecer torque adicional ao veículo, auxiliando na aceleração e melhorando a performance em diversas condições de condução. Além disso, o controlador do '*MotorGenerator*' é programado para gerenciar a entrega de potência, equilibrando o uso da energia elétrica com a operação do motor de combustão interna, conforme necessário, para garantir uma experiência de condução suave e eficiente. A integração deste componente no modelo é essencial para maximizar a eficiência do sistema híbrido e reduzir as emissões durante a operação. A Figura 8 mostra a interface do software com bloco '*ParallelHybridController*' em destaque.

Figura 9 – Componente '*ParallelHybridController*' do IGNITE



Fonte: Autor (2024)

O bloco *ParallelHybridController* no modelo numérico é responsável pelo gerenciamento e controle da energia elétrica fornecida ao motor elétrico, desempenhando um papel fundamental na otimização do desempenho do sistema híbrido. Ele coordena a distribuição de potência entre o motor elétrico e o motor de combustão interna, tanto durante a propulsão elétrica quanto na frenagem regenerativa. Durante a frenagem regenerativa, o controlador também gerencia a recarga da bateria, garantindo que a energia seja armazenada de maneira eficiente quando necessário. O controlador ajusta o funcionamento do motor elétrico com base no estado de carga da bateria e nas demandas do veículo, assegurando o uso otimizado da energia disponível.

Além disso, os parâmetros do bloco foram definidos de forma a garantir que o motor de combustão interna funcione de maneira eficiente em regiões de baixa carga e baixa rotação, com o objetivo principal de melhorar o desempenho na configuração HCCI. Embora o controlador tenha sido inicialmente configurado para a versão HCCI, ele também será utilizado

na versão convencional do motor, permitindo uma análise comparativa dos efeitos de ambas as configurações no desempenho geral do sistema. A Tabela 5 apresenta os parâmetros específicos definidos para o controlador, os quais são fundamentais para a avaliação do impacto das diferentes estratégias de controle adotadas no estudo.

Tabela 5 – Parâmetros definidos no controlador híbrido

Parâmetro	Valor
Limite inferior de demanda de *Boost*	0,25
Limite superior de demanda de *Boost*	1
Desativar *Boost* no estado de carga da bateria	0,4
Estado de carga da bateria para geração máxima	0,3
Estado de carga da bateria para zero geração	0,95
Velocidade máxima do motor	2500 RPM
Velocidade de zero geração	1000 RPM
Estado de carga da bateria máximo para permitir regeneração	0,95
Limite de demanda para desligar o motor elétrico	0
Limite de demanda para ligar o motor elétrico	0,01

Fonte: Autor (2024)

A tabela apresenta os parâmetros de controle do modelo numérico usados para gerenciar o sistema híbrido. O "Limite inferior de demanda de *Boost*"e o "Limite superior de demanda de *Boost*"definem os pontos de ativação do motor elétrico em diferentes níveis de carga. O "Desativar *Boost* no estado de carga da bateria"controla a carga da bateria, impedindo o *Boost* quando atinge um valor específico. O "Estado de carga da bateria para geração máxima"e o "Estado de carga da bateria para zero geração"determinam a carga necessária para o motor gerar a máxima energia ou parar de gerar. A "Velocidade máxima do motor"e a "Velocidade de zero geração"ajustam a rotação do motor de combustão. O "Estado de carga da bateria máximo para permitir regeneração"estabelece o limite de carga para permitir a regeneração, enquanto os parâmetros "Limite de demanda para desligar o motor elétrico"e "Limite de demanda para ligar o motor elétrico"definem quando o motor elétrico deve ser ativado ou desativado conforme a carga da bateria e a demanda do veículo. Quanto aos demais parâmetros relevantes para este modelo, eles são os mesmos apresentados na Tabela 4.

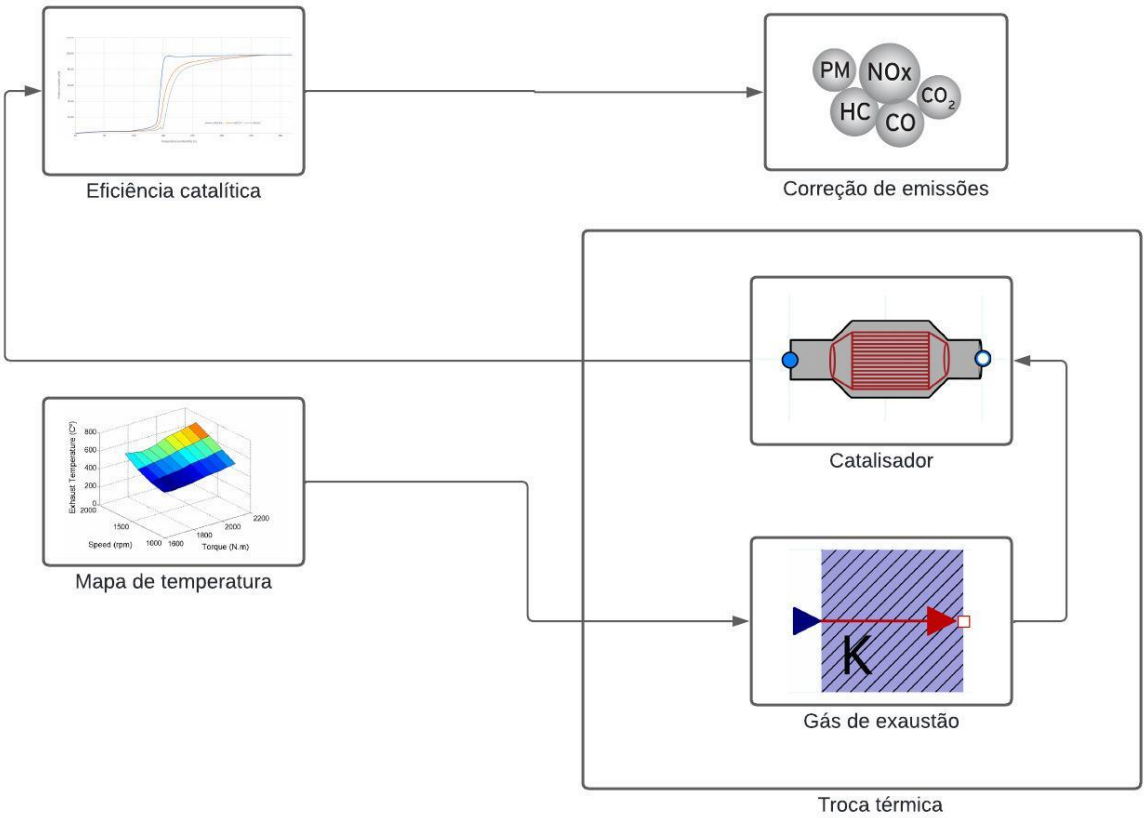
4.5 Catalisador automotivo

O catalisador automotivo empregado neste estudo foi desenvolvido utilizando a linguagem Python, com foco na melhoria da eficiência de conversão dos principais poluentes gerados durante a combustão interna: CO, HC e NO_x. As curvas de eficiência do catalisador

foram obtidas por meio dos ensaios experimentais que reproduziram as condições operacionais reais às quais o catalisador é submetido. Esse procedimento é fundamental para garantir que o modelo numérico desenvolvido apresente um elevado grau de precisão, assegurando que o desempenho do modelo se mantenha alinhado às condições reais de funcionamento.

As emissões a serem corrigidas pelo catalisador foram simuladas através do IGNITE, utilizando o componente '*BasicEngine*' para gerar as emissões brutas ao longo do ciclo FTP-75. O modelo desenvolvido incorpora a criação de um mapa de temperaturas dos gases de exaustão do MCI, o qual é alimentado com os dados instantâneos de torque e rotação. Esses dados são, então, utilizados para acionar um bloco responsável pela troca térmica entre os gases de exaustão e o monólito do catalisador dentro de um modelo de diferenças finitas. Através desse processo, determina-se a temperatura do monólito, que posteriormente serve como parâmetro para alimentar as curvas de eficiência de cada componente poluente a ser tratado. A Figura 10 mostra o funcionamento do catalisador elaborado em Python.

Figura 10 – Fluxograma de funcionamento do modelo de catalisador



Fonte: Autor (2024)

O mapa de temperaturas de exaustão e as curvas de eficiência utilizadas no modelo foram desenvolvidos com base em dados experimentais provenientes de ensaios realizados em dinamômetro de bancada. A integração dos dados experimentais com simulações numéricas aprimora significativamente a precisão na modelagem do desempenho do catalisador sob diversas condições operacionais. Esta abordagem integrada facilita a análise de estratégias para a redução de emissões poluentes, alinhando-se às regulamentações ambientais em vigor. O modelo de troca térmica foi baseado na Equação 4.1, que descreve como o calor transferido por convecção entre os gases de exaustão e o monólito do catalisador é equivalente à quantidade de calor absorvida pelo catalisador. Esse processo é fundamental para definir a temperatura do monólito, que, por sua vez, influencia diretamente a eficiência de conversão dos poluentes.

$$m_{cat} \cdot c_{cat} \frac{dT}{dt} = h \cdot A_{sl} \cdot (T_{ex} - T_{cat}) + \Delta\dot{m}_{HC} \cdot PCI_{HC} + \Delta\dot{m}_{CO} \cdot PCI_{CO} - h_{ar} \cdot A_{se} \cdot (T_{cat} - T_{amb}) \quad (4.1)$$

Onde m_{cat} é a massa do catalisador, c_{cat} é o calor específico do catalisador, h é o coeficiente de convecção para a troca térmica com os gases de escape, h_{ar} é o coeficiente de convecção para a troca térmica com o ambiente de referência, A_{sl} é a área superficial longitudinal interna do catalisador, A_{se} é a área superficial externa do catalisador, T_{cat} é a temperatura do catalisador, T_{ex} é a temperatura de exaustão dos gases poluentes, T_{amb} é a temperatura do ambiente de referência, $\Delta\dot{m}_{HC}$ é a variação de massa de HC que passam pelo catalisador, $\Delta\dot{m}_{CO}$ é a variação de massa de CO e PCI_{HC} juntamente com PCI_{CO} são seus respectivos poderes caloríficos inferiores. A equação diferencial foi resolvida empregando o método de Euler, o qual envolveu a discretização da equação com um intervalo de integração equivalente ao passo de tempo da simulação do ciclo de condução no IGNITE, esse procedimento garante que a resolução numérica esteja alinhada com a passo temporal da simulação. Para esse fim, a Equação 4.1 foi discretizada e originou a Equação 4.2 que calcula a temperatura no passo de tempo posterior.

$$T_{i+1} = T_i + \frac{dt}{m_{cat} \cdot c_{cat}} [h \cdot A_{sl} \cdot (T_{ex} - T_i) + \Delta\dot{m}_{HC} \cdot PCI_{HC} + \Delta\dot{m}_{CO} \cdot PCI_{CO} - h_{ar} \cdot A_{se} \cdot (T_i - T_{amb})] \quad (4.2)$$

No presente estudo, alguns parâmetros do modelo numérico, cuja determinação experimental ou bibliográfica é limitada, foram estabelecidos como constantes a serem otimizadas por meio de técnicas avançadas de otimização. Para alcançar esse objetivo, foi empregado o

Algorítmo Genético (AG), implementado por meio da biblioteca Python *pymoo* desenvolvida por Blank e Deb (2020). Nesse contexto, variáveis críticas como a massa do monólito, o poder calorífico, as áreas superficiais e os coeficientes de convecção foram agrupadas em três constantes otimizáveis, conforme expressam as equações 4.3, 4.4 e 4.5. A otimização dessas constantes foi fundamental para alinhar os resultados do modelo numérico aos dados experimentais, assegurando maior precisão na simulação do sistema.

$$\alpha_1 = \frac{1}{m_{cat} \cdot c_{cat}} \tag{4.3}$$

$$\alpha_2 = \frac{h \cdot A_{sl}}{m_{cat} \cdot c_{cat}} \tag{4.4}$$

$$\alpha_3 = \frac{h_{ar} \cdot A_{se}}{m_{cat} \cdot c_{cat}} \tag{4.5}$$

Para a execução desta simulação, foi necessário definir uma função objetivo que permitisse aproximar o modelo numérico ao comportamento real observado. Como os valores calculados ao longo do tempo foram comparados com as temperaturas reais do monólito, a função objetivo escolhida foi aquela que mede o erro relativo entre dois conjuntos de dados, visando minimizar essa discrepância. O objetivo central do problema de otimização, portanto, é reduzir o erro ao máximo, assegurando maior precisão nos resultados simulados. Para isso, foi adotada a função *Root Mean Square Error* (RMSE), a qual se mostrou adequada para quantificar e minimizar a diferença entre as previsões do modelo e os dados experimentais, proporcionando uma correspondência mais fiel entre o modelo computacional e o comportamento real do sistema. A Equação 4.6 mostra a função objetivo definida para calcular a aptidão de cada indivíduo presente no modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N} (T_{calc} - T_{real})^2}{N}} \tag{4.6}$$

Onde T_{calc} e T_{real} representam, respectivamente, a temperatura calculada pelo modelo e a temperatura real medida em cada instante de tempo, sendo N o número total de dados em cada conjunto. Os parâmetros de otimização das constantes do modelo numérico do catalisador, obtidos por meio do AG, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Especificação do processo de otimização

Número de gerações	100
Número de população inicial	20
Número de novos descendentes	10
Método de *crossover*	"*Simulated Binary Crossover*"
Método de mutação	"*Polynomial Mutation*"
Método de amostragem	"*Latin Hypercube Sampling*"

Fonte: Autor (2024)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

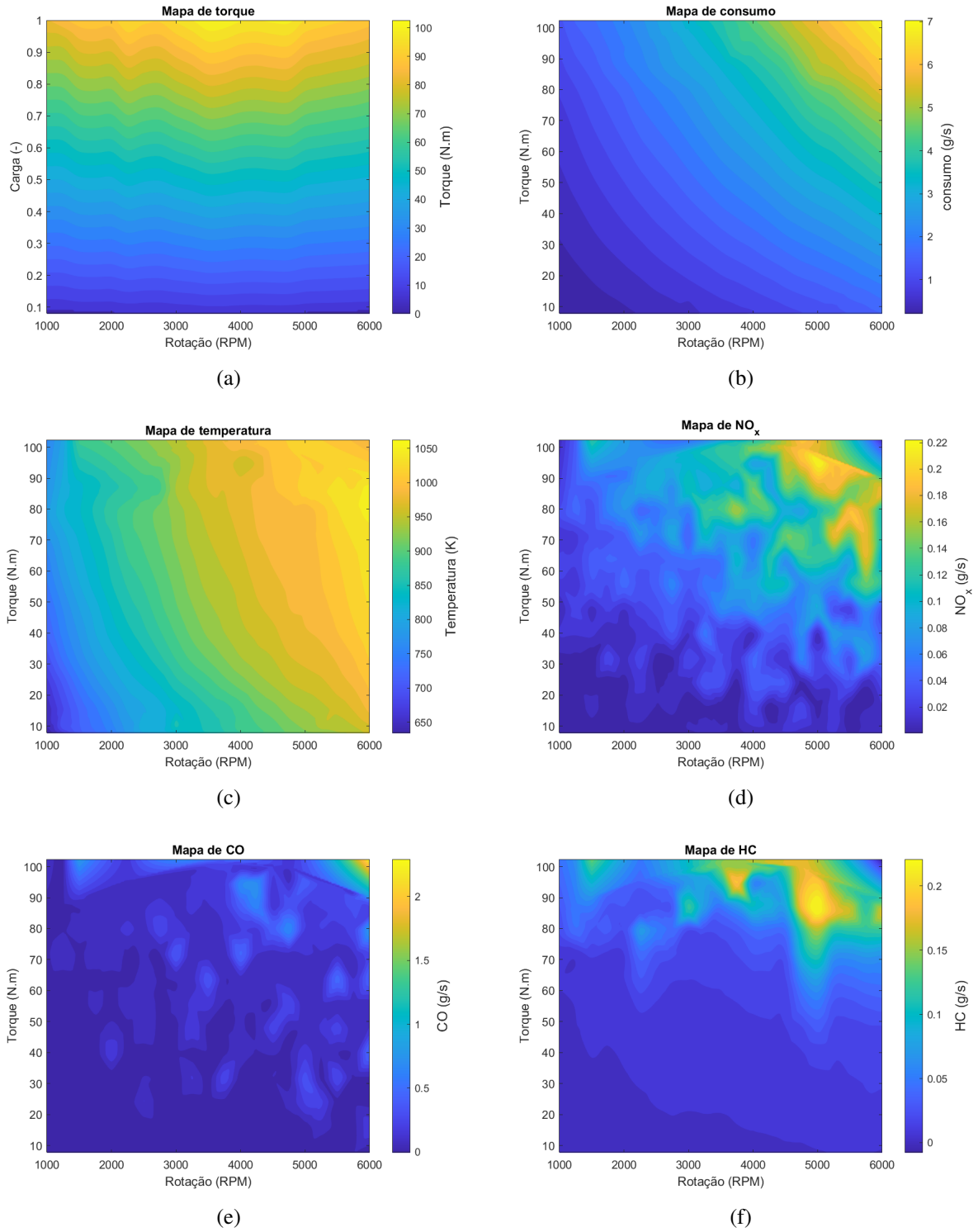
5.1 Ensaios experimentais

Os ensaios realizados no dinamômetro de bancada permitiram a obtenção dos mapas de desempenho do motor, conforme apresentado na Figura 11. A análise do mapa de torque revela um comportamento característico, onde o torque aumenta de forma gradativa com o incremento da carga aplicada ao motor, atingindo seu valor máximo na faixa de 3000 a 5000 RPM sob condições de carga plena. Este comportamento é crucial para a avaliação da performance do motor, uma vez que indica a eficiência na conversão de energia durante o funcionamento. O mapa de consumo de combustível, por sua vez, indica que as taxas mais elevadas de consumo estão localizadas nas regiões de alto torque e alta rotação, evidenciando um aumento progressivo nesta relação. Esse achado sugere uma correlação entre a eficiência do motor e suas condições operacionais, o que pode ser de interesse para otimizações futuras visando a redução do consumo.

Em relação às emissões, foram monitoradas as concentrações de CO, HC e NO_x. No mapa correspondente às emissões de NO_x, observou-se um aumento constante nas concentrações em função do aumento simultâneo do torque e da rotação do motor. O pico de emissão de NO_x foi identificado na faixa de 5000 RPM, com torque em torno de 90 Nm. Esses resultados são relevantes para a compreensão das emissões poluentes associadas ao funcionamento do motor em diferentes condições de operação. No que diz respeito ao CO, as concentrações mais elevadas estão distribuídas ao longo de todo o mapa, com picos mais acentuados observados em condições de alto torque, culminando em seu valor máximo na máxima rotação. Esse padrão sugere uma necessidade de investigação adicional sobre a relação entre a formação de CO e as condições de operação do motor.

As emissões de HC apresentaram um padrão similar ao das emissões de NO_x, porém, as concentrações de HC se mostraram menos dispersas na região de baixa rotação, evidenciando uma elevação gradual com picos localizados em regiões semelhantes. Esse comportamento destaca a importância de considerar não apenas os picos, mas também a distribuição das emissões ao longo das diferentes faixas de operação do motor. Por último, o mapa das temperaturas de escape demonstra um comportamento que se assemelha a uma função linear, atingindo valores significativos já na faixa de 4000 RPM. Essa informação é crucial, pois temperaturas elevadas nos gases de escape podem ter implicações diretas na eficiência térmica do motor e nas estratégias de controle de emissões.

Figura 11 – Mapas de desempenho do BR10: (a) Torque, (b) Consumo, (c) Temperatura, (d) NO_x, (e) CO e (f) HC.



Fonte: Autor (2024)

Os mapas correspondentes ao modo de combustão HCCI foram obtidos de maneira indireta, baseando-se no desempenho de motor de teste operando sob este modo de combustão específico. A análise comparativa entre os modos de operação resultou em um mapeamento

das diferenças, que estão claramente ilustradas na Figura 12, a qual mostra os mapas para o modo HCCI. Ao observar o mapa de torque, é evidente que as alterações são mais pronunciadas nas regiões de baixa carga e baixa rotação. Nesses intervalos, o modo HCCI demonstra um comportamento distinto, proporcionando uma eficiência de combustão aprimorada, o que resulta em um torque otimizado nessas condições. Em contraste, as áreas de operação em alta carga e alto torque permanecem relativamente inalteradas, isso acontece devido à eficácia do HCCI ser mais relevante em situações de menor exigência. O mapa de consumo de combustível também revela alterações significativas nas regiões de baixa carga e baixa rotação. O modo HCCI, ao promover uma combustão mais homogênea e controlada, permite uma melhor utilização do combustível, refletindo-se em menores taxas de consumo nessas condições. Contudo, as altas rotações e os altos torques continuam apresentando o padrão habitual de consumo elevado.

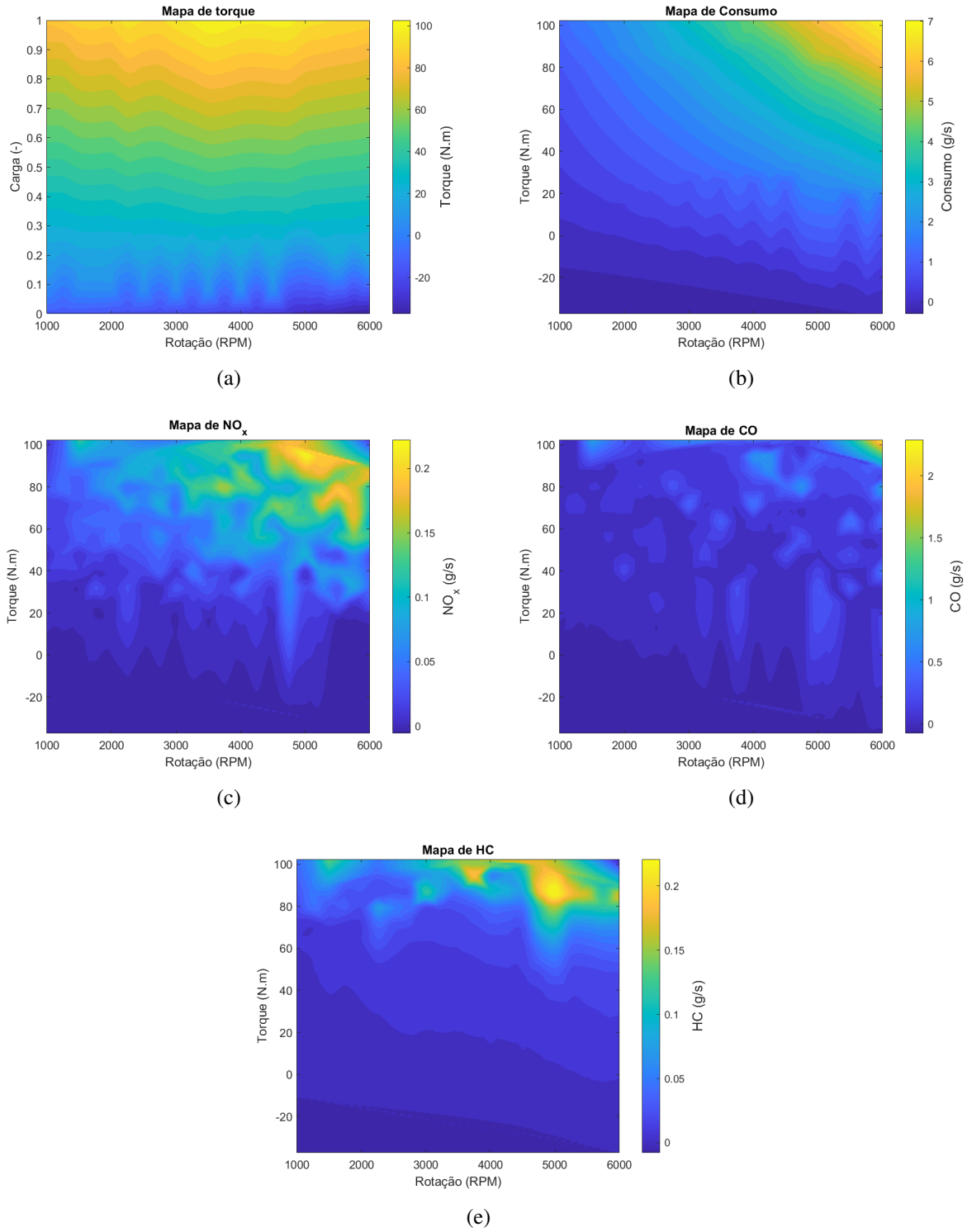
No que diz respeito às emissões, o mapa de NO_x mostra uma tendência interessante: sob o modo HCCI, as emissões de NO_x se apresentam reduzidas nas faixas de baixa carga e baixa rotação, em comparação com os modos tradicionais de combustão. Essa redução é crucial, pois indica uma melhoria na eficiência do controle das emissões, contribuindo para um funcionamento mais limpo do motor. Os mapas de CO e HC também seguem um padrão similar, onde o modo HCCI resulta em menores concentrações de emissões nas regiões de baixa carga e baixa rotação, refletindo o potencial deste modo de combustão para mitigar a formação de poluentes. Em suma, as mudanças nos mapas associados ao modo de combustão HCCI sublinham a importância deste método na otimização do funcionamento do motor, especialmente em condições de operação menos exigentes, o que pode levar a melhorias significativas em eficiência e redução de emissões.

5.2 Validação do modelo numérico do veículo

Para o início do processo de simulação, é fundamental dispor de um modelo numérico do veículo que tenha sido previamente validado, uma vez que todas as modificações subsequentes dependerão da precisão deste modelo. Nesse contexto, o modelo apresentado na Figura 4 foi submetido a simulações, e os principais dados de saída foram analisados e comparados com o intuito de validar a sua eficácia. A validação do modelo é conduzida com base na análise do consumo do veículo ao longo do ciclo, sendo esta comparada com os dados experimentais disponíveis. A Figura 13 ilustra o consumo de combustível do veículo ao longo do ciclo, evidenciando o desempenho esperado em relação às condições operacionais definidas.

Para realizar a validação do modelo numérico, foi considerado o valor final acu-

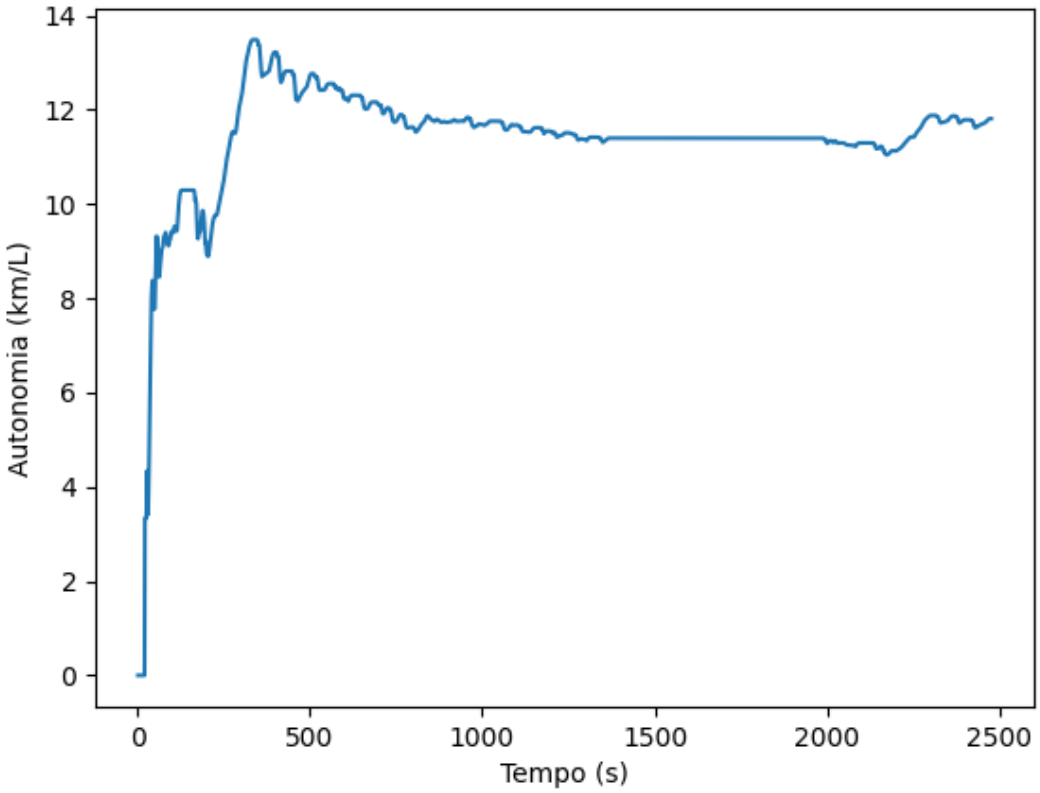
Figura 12 – Mapas de desempenho do BR10 corrigido para regime HCCI: (a) Torque, (b) Consumo, (c) NO_x, (e) CO e (f) HC.



Fonte: Autor (2024)

mulado ao término do ciclo de simulação, conforme apresentado na Figura 13. Esses valores acumulados foram comparados diretamente com os dados experimentais correspondentes, detalhados na Tabela 7. A discrepância entre os resultados simulados e os experimentais foi calculada

Figura 13 – Consumo do modelo numérico simulado



Fonte: Autor (2024)

e apresentou um erro de apenas 0,26%, indicando uma excelente concordância entre os dados e uma validação confiável do modelo desenvolvido. É importante destacar que a validação realizada não incluiu uma análise das emissões, pois o modelo de veículo disponível no software IGNITE não possui um modelo de catalisador adequado aos objetivos específicos deste trabalho. Essa limitação evidenciou a necessidade de desenvolver um modelo de catalisador próprio, projetado para atender às exigências da pesquisa. Essa abordagem permitiu maior controle sobre os parâmetros relevantes para a investigação e assegurou que as condições do modelo numérico refletissem de maneira mais fiel as características operacionais do sistema real.

Tabela 7 – Validação do modelo convencional do IGNITE

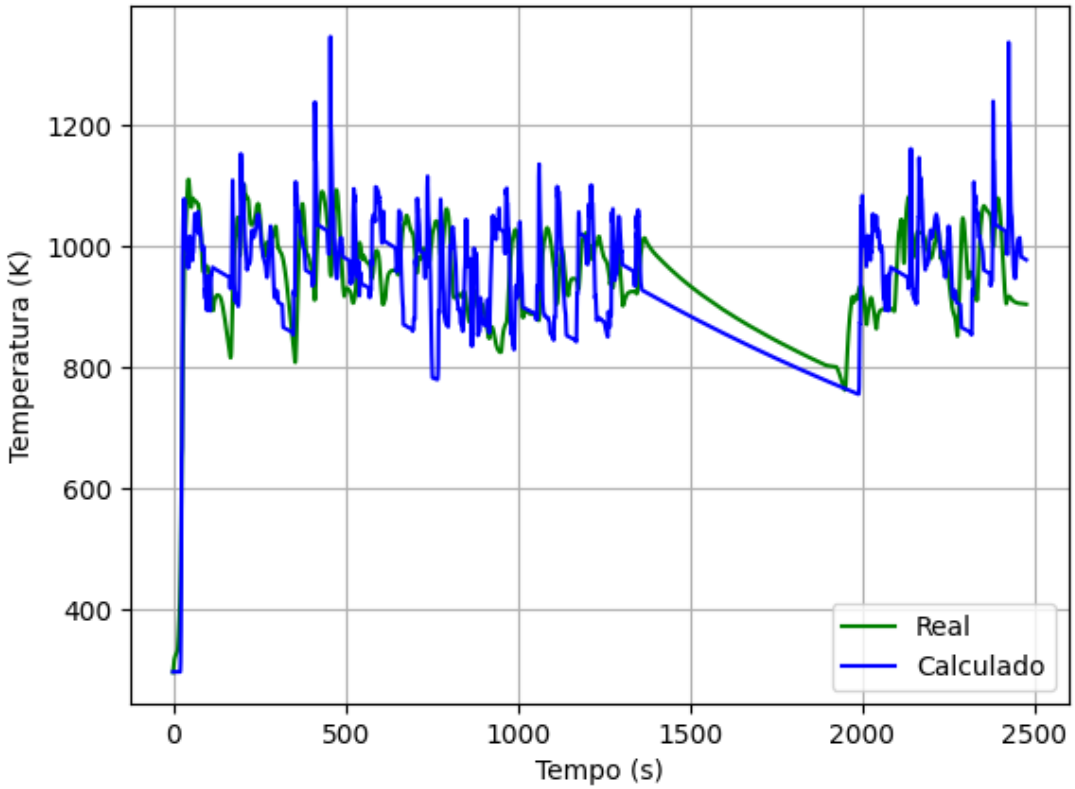
Consumo do veículo convencional	11,30 km/L
Consumo do modelo numérico	11,27 km/L
Erro relativo	0,2655%

Fonte: Autor (2024)

5.3 Validação do catalisador

Na validação do catalisador, foi utilizado o ciclo FTP-75 de modo a avaliar a performance do modelo em diferentes condições operacionais. As constantes otimizadas, conforme os parâmetros listados na Tabela 6, foram determinadas com base na análise da curva de temperatura experimental apresentada na Figura 14. Esta curva foi desenvolvida especificamente para o ciclo FTP-75, que é o padrão estabelecido no Brasil.

Figura 14 – Resultado ótimo do catalisador

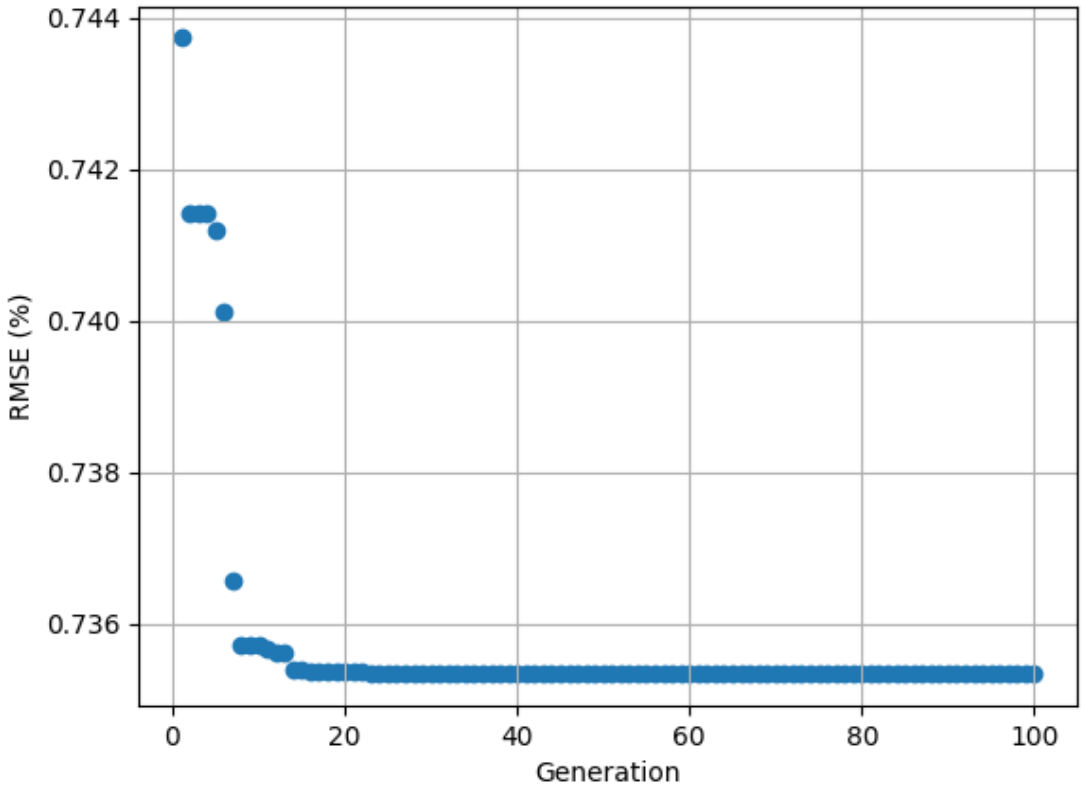


Fonte: Autor (2024)

O processo de otimização possibilitou a determinação precisa dos valores das constantes, no qual $\alpha_1 = 9,999999972e-5$, $\alpha_2 = 2,87612958e-5$ e $\alpha_3 = 5,06234745e-4$. A partir dessas constantes otimizadas, foi possível calcular a curva de temperaturas para cada instante ao longo do ciclo de condução, a qual também pode ser visualizada na Figura 14. Além disso, foi calculado o RMSE para os conjuntos de dados, o que fornece uma medida quantitativa da precisão do modelo em relação aos dados experimentais. Essa análise detalhada dos resultados é fundamental para assegurar a confiabilidade e a aplicabilidade do modelo de

catalisador desenvolvido no contexto das condições de operação definidas. A Figura 15 mostra a evolução do modelo numérico do catalisador automotivo ao longo das gerações.

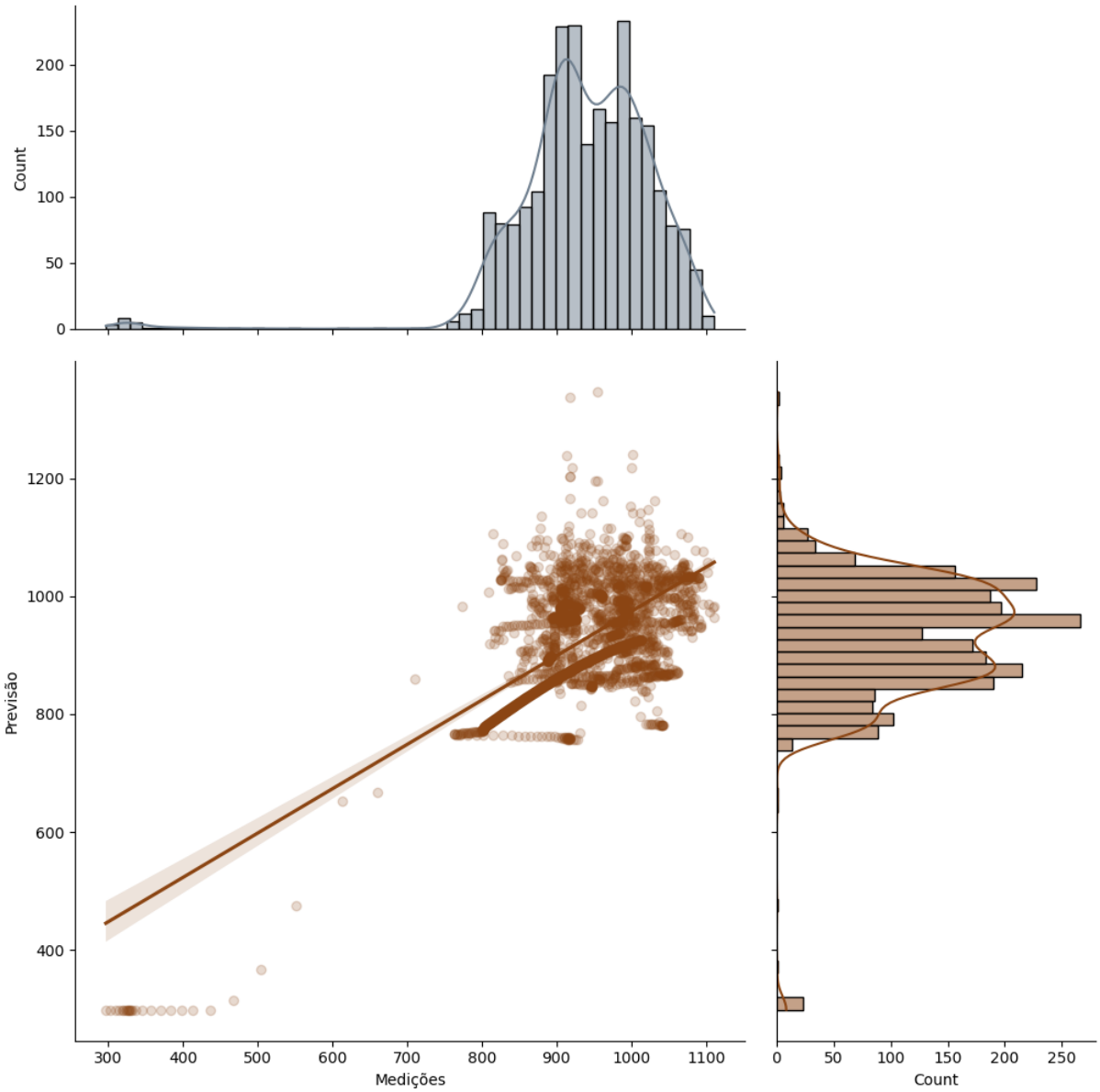
Figura 15 – Evolução do modelo catalisador no processo de otimização



Fonte: Autor (2024)

Como mostrado na Figura 15, o modelo apresenta convergência a partir da vigésima geração, momento em que o ponto ótimo foi alcançado. No entanto, as gerações subsequentes continuaram a ser executadas, pois o critério de parada ainda não havia sido atendido. De acordo com o critério definido, a otimização seria finalizada somente se a tolerância de 0,001 fosse mantida por 50 gerações consecutivas. Após a vigésima geração, o valor de RMSE variou pouco, o que impediu que o critério de parada fosse alcançado. Vale ressaltar que o valor de RMSE foi multiplicado pela eficiência de conversão de NO_x, com o objetivo de favorecer os cálculos na região de *light-off* do catalisador. A região de *light-off* é o intervalo de temperatura no qual a eficiência de conversão dos poluentes aumenta de forma significativa, que para esse caso é início de operação do ciclo de condução. A Figura 16 mostra a semelhança presente entre os resultados do modelo numérico e do modelo real.

Figura 16 – Medição x Previsão da variável temperatura no modelo numérico do catalisador



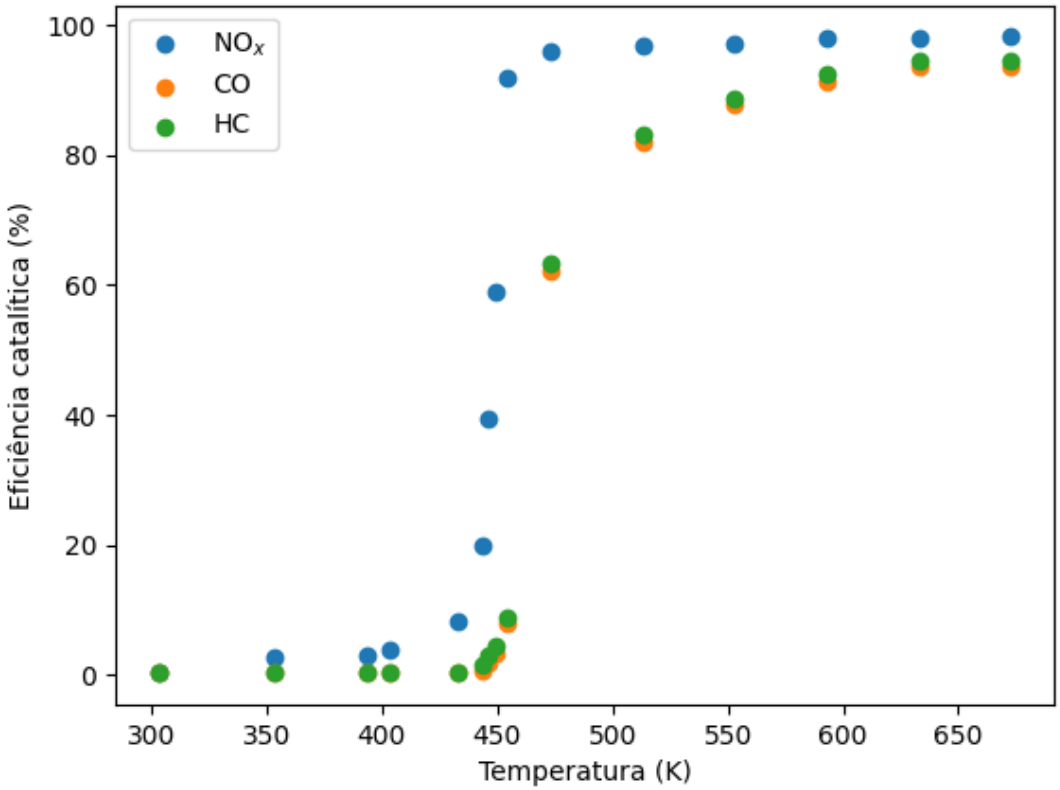
Fonte: Autor (2024)

O gráfico de dispersão apresentado ilustra a comparação entre os valores calculados pelo modelo numérico e os valores reais, por meio de uma análise de convergência. Neste contexto, a linearização é utilizada para verificar a precisão do modelo, sendo que o ideal seria que os pontos se alinhassem perfeitamente à reta de referência. No entanto, ao analisar o gráfico, observa-se que os pontos não ficam exatamente sobre a reta, indicando que o resultado do modelo não é totalmente preciso. Apesar disso, é possível perceber uma forte concentração dos pontos na região em torno de 800 e 1100 K, para ambos os eixos de valor calculado e valor real. Essa concentração é destacada por círculos escuros próximos à reta, evidenciando a grande quantidade

de pontos presentes nessa faixa. Isso sugere que, embora existam pequenas discrepâncias, o modelo numérico apresenta uma boa convergência dentro dessa faixa de operação

Com os parâmetros devidamente otimizados, o modelo numérico do catalisador foi considerado concluído e apto para aplicação. Nesse contexto, foi realizada uma co-simulação entre o modelo de dinâmica veicular, implementado no software IGNITE, e o modelo de catalisador desenvolvido em Python. Para facilitar essa integração, foi elaborado um script em Python que permitiu a execução da simulação, garantindo que os dados de emissão fossem automaticamente corrigidos ao longo do ciclo de operação. Para a correta execução da simulação, foram necessárias as curvas de eficiência catalítica, que variam em função da temperatura do monólito. A Figura 17 ilustra as eficiências catalíticas correspondentes aos poluentes NO_x, CO e HC, as quais foram obtidas experimentalmente. A utilização dessas curvas é fundamental para assegurar a precisão das correções de emissão durante a simulação, contribuindo para a fidelidade dos resultados obtidos no processo de co-simulação.

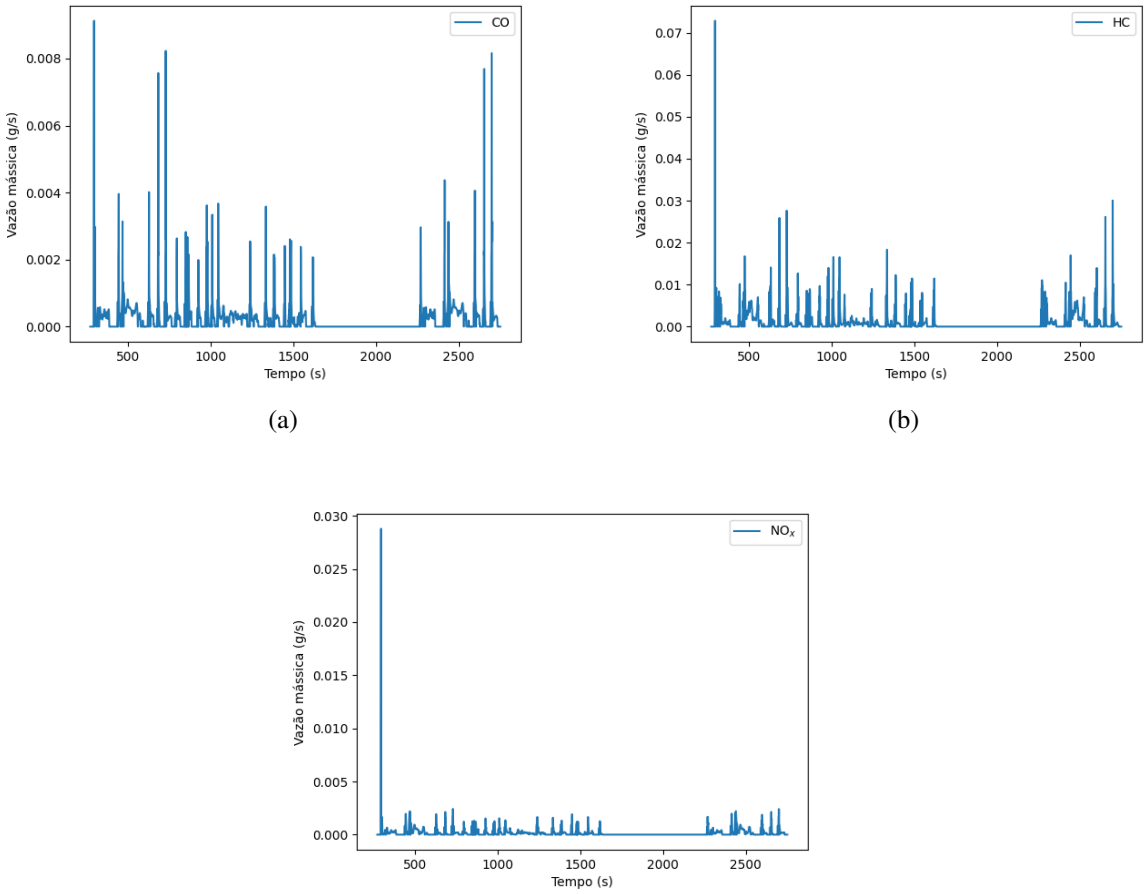
Figura 17 – Eficiências catalíticas



Fonte: Autor (2024)

Com base nas curvas de eficiência catalítica, os valores de emissões foram monitorados ao longo do ciclo de condução e, posteriormente, comparados com os dados experimentais. O objetivo dessa comparação foi verificar a acurácia do modelo numérico desenvolvido para o catalisador. A validação deste modelo é crucial para assegurar que ele reflita com precisão o desempenho do catalisador em condições reais de operação. A Figura 18 apresenta as emissões tratadas pelo catalisador ao longo do ciclo de condução e a Tabela 8 fornece uma comparação detalhada entre os dados reais de emissões e aqueles obtidos por meio do cálculo.

Figura 18 – Emissões corrigidas pelo catalisador para o veículo convencional. (a) CO, (b) HC e (c) NO_x



(a) (b)

(c)

Fonte: Autor (2024)

A análise comparativa apresentada na Tabela 8 é essencial para avaliar a robustez do modelo numérico e sua capacidade de prever com precisão o comportamento do catalisador sob diferentes condições operacionais. Observou-se que os valores estimados de emissões estão em estreita concordância com os valores experimentais, com o maior erro percentual inferior a 3%.

Tabela 8 – Validação do modelo numérico do catalisador

	Emissão de NO_x	Emissão de HC	Emissão de CO
Experimental	25 mg/km	35 mg/km	158 mg/km
Calculado	25,56 mg/km	35,82 mg/km	160,56 mg/km
Erro relativo	2,24%	2,34%	1,62%

Fonte: Autor (2024)

Esse resultado reforça a validade do modelo desenvolvido, demonstrando que ele está apto para uso em simulações subsequentes. A partir dessa validação, o modelo numérico pode ser aplicado a diferentes variações de veículos, expandindo sua utilidade e aplicabilidade em estudos futuros. Os valores de emissões foram calculados pela integração dos dados da Figura 18 ao longo do tempo, e posteriormente normalizados pela distância percorrida durante o ciclo de condução, permitindo uma avaliação precisa das emissões totais por quilômetro rodado.

5.4 Veículo com modo de combustão HCCI

Após a validação do modelo numérico do veículo convencional, torna-se essencial compreender o desempenho do veículo operando em modo de combustão HCCI. Para isso, os dados foram gerados considerando essa configuração, que inclui a integração do catalisador previamente validado. Os resultados estão presentes na Tabela 9, que apresenta uma comparação detalhada entre as emissões e o consumo de combustível de duas configurações distintas: o veículo convencional simulado e uma versão modificada para operar no modo HCCI. Essa comparação permite avaliar o impacto da adaptação para HCCI, considerando tanto as emissões poluentes quanto a eficiência energética do veículo, sendo um passo fundamental para a análise de viabilidade da tecnologia em termos de sustentabilidade e desempenho operacional.

Tabela 9 – Consumo e emissões do veículo convencional e HCCI ao longo do ciclo de condução

	Consumo	Emissão de NO_x	Emissão de HC	Emissão de CO
Convencional	11,27 km/L	25,56 mg/km	35,82 mg/km	160,56 mg/km
HCCI	11,57 km/L	24,58 mg/km	36,16 mg/km	171,99 mg/km
Redução	-2,66%	3,83%	-0,95%	-7,12%

Fonte: Autor (2024)

Com base nos resultados apresentados na Tabela 9, pode-se concluir que o veículo equipado com a tecnologia HCCI demonstrou um aumento no consumo de aproximadamente 2,6%. Esse ganho pode ser considerado significativo, especialmente quando se trata de otimização de sistemas complexos, como o motor, o *powertrain* e o consumo de combustível. Melhorias

dessa ordem, embora aparentemente modestas, representam avanços substanciais, dado que a eficiência desses sistemas frequentemente apresenta margens de otimização restritas.

Observou-se um aumento significativo nas emissões de CO, com valores cerca de 7% superiores aos níveis originais. Esse aumento é um fenômeno esperado em configurações HCCI, devido às características intrínsecas desse tipo de combustão. Contudo, um incremento dessa magnitude pode ser preocupante, pois pode afetar negativamente a eficiência ambiental do sistema. Ainda assim, as emissões de CO permanecem abaixo dos limites estabelecidos pela fase L7 do PROCONVE (BRASIL, 2018b). Em relação às emissões de HC, foi registrado um aumento pequeno, quase insignificante, que é razoavelmente atribuído às características típicas da configuração HCCI. Por fim, as emissões de NO_x apresentaram a diminuição esperada, alinhando-se com o comportamento projetado para essa configuração de combustão.

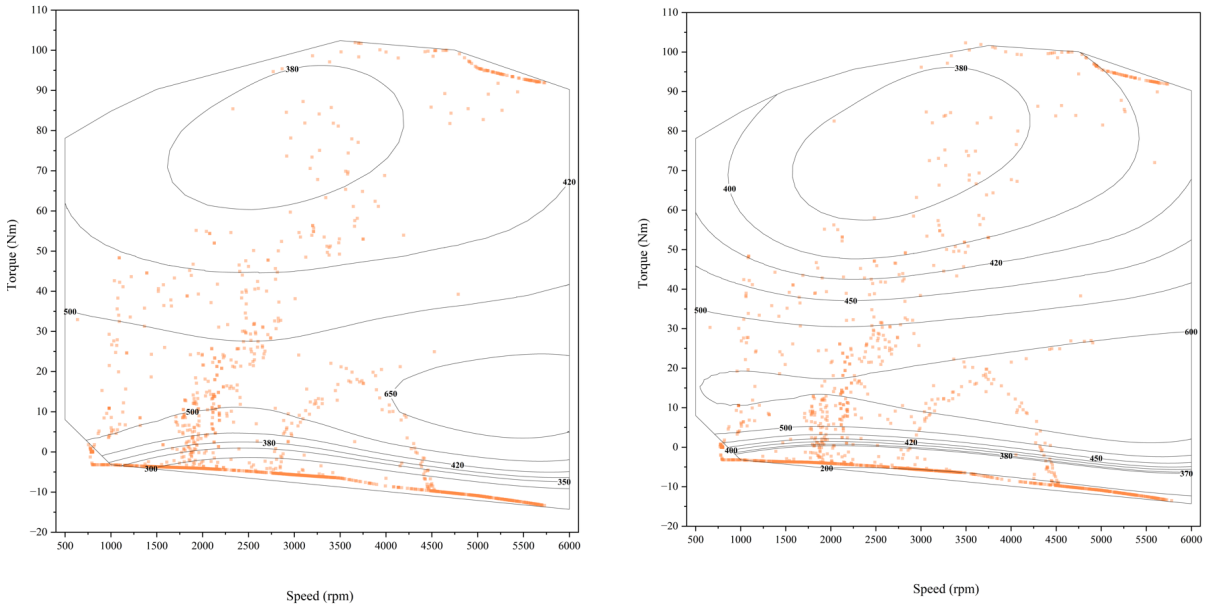
5.4.1 Regime de operação dos modelos de powertrain convencional

Na comparação entre as duas configurações de veículos, foi utilizada a técnica de mapas de calor para analisar as regiões de operação dos motores, com foco no tempo de permanência em faixas de consumo e emissões específicas. O objetivo foi identificar em qual região cada motor mais permaneceu durante o ciclo de operação, considerando as diferentes faixas de torque e rotação. Para tanto, a Figura 19 mostra os mapas de calor referentes ao consumo específico de combustível.

A principal diferença observada entre as configurações ocorreu nas regiões de baixo torque e baixa rotação, onde o motor HCCI apresentou um tempo de permanência significativamente maior. Esse comportamento é refletido na maior quantidade de pontos de cor laranja no mapa de calor, indicando uma operação mais constante nessas condições. Tais regiões são cruciais para o desempenho do motor HCCI, que tende a operar de maneira mais eficiente e estável nessas faixas.

Quando o motor HCCI sai dessas regiões de baixo torque e baixa rotação, a distribuição dos pontos no mapa de calor começa a se aproximar mais da configuração com o motor BR10 convencional, com uma maior sobreposição de pontos nas faixas de maior torque e rotação. Isso sugere que, ao operar fora da faixa de baixa carga, o motor HCCI apresenta um comportamento semelhante ao do motor convencional, com uma distribuição de consumo específico que tende a se alinhar às características mais típicas de motores convencionais. Esse comportamento evidencia que o motor HCCI tem uma vantagem significativa em regiões de

Figura 19 – Regime de operação de consumo de combustível específico: (a) HCCI (b) ICe

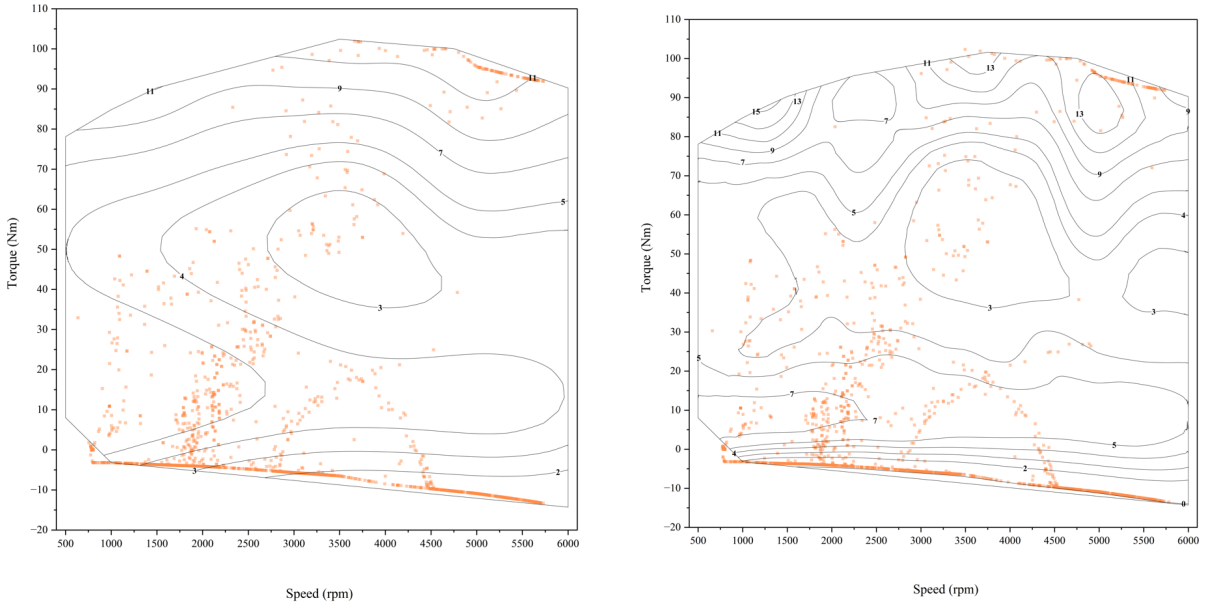


(a) (b)

Fonte: Autor (2024)

baixa carga e rotação, mas que a sua eficiência pode ser prejudicada quando opera em faixas de maior carga, onde o motor BR10 convencional parece apresentar desempenho mais eficiente. As figuras 20, 21 e 22 mostram os mapas de calor referentes às emissões específicas de HC, CO e NO_x, respectivamente.

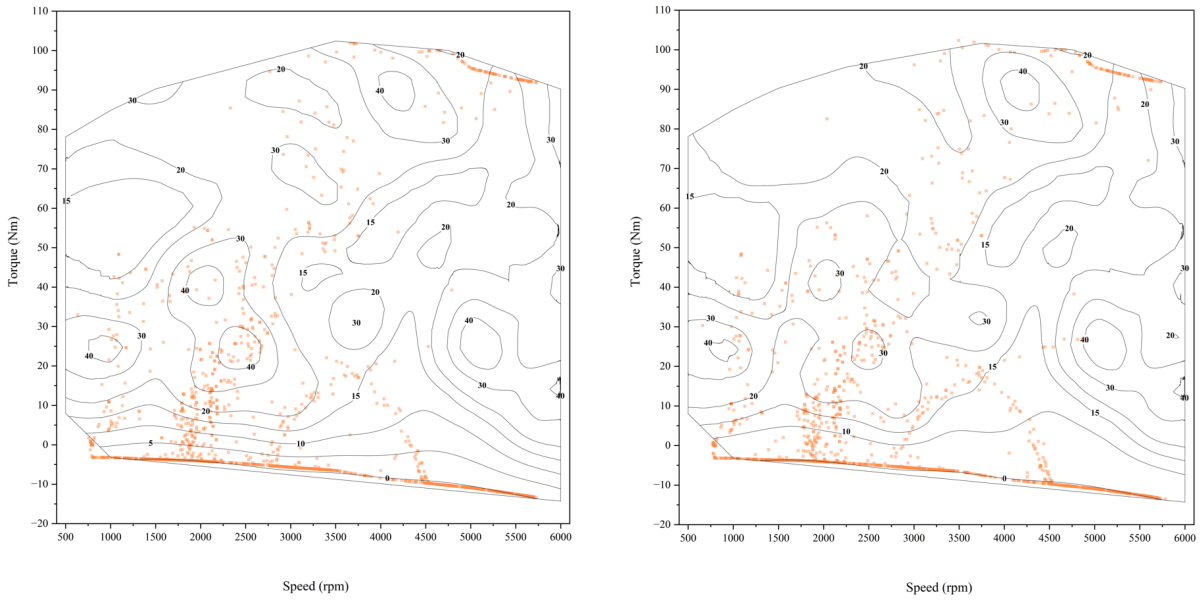
Figura 20 – Regime de operação de emissão de HC específico: (a) HCCI (b) ICe



(a) (b)

Fonte: Autor (2024)

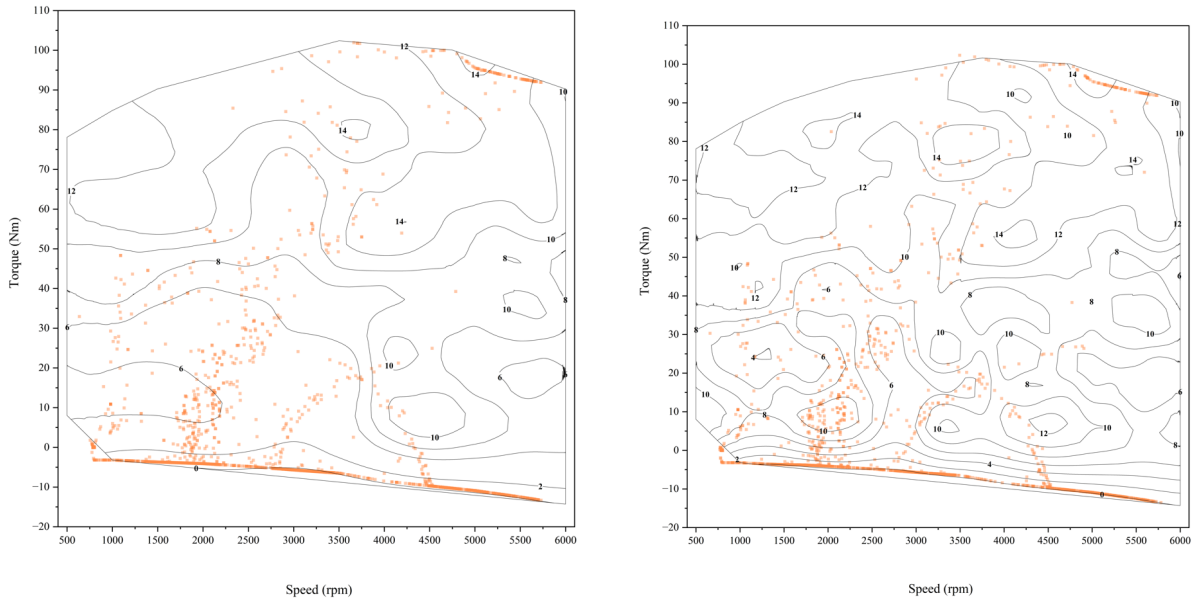
Figura 21 – Regime de operação de emissão de CO específico: (a) HCCI (b) ICe



(a) (b)

Fonte: Autor (2024)

Figura 22 – Regime de operação de emissão de NO_x específico: (a) HCCI (b) ICe



(a) (b)

Fonte: Autor (2024)

Na análise comparativa das emissões específicas de CO, HC e NO_x entre as duas configurações de motores, foram utilizados mapas de calor para identificar as regiões de operação predominantes em termos de torque e rotação, com foco na permanência dentro de faixas de emissões. O comportamento observado apresentou semelhanças com o padrão identificado para o consumo específico de combustível, destacando diferenças importantes entre os motores

analisados. Para os casos de HC e NO_x, foi possível observar uma maior concentração de pontos em regiões de baixo torque e baixa rotação no motor HCCI, evidenciadas por valores reduzidos quando comparados ao motor BR10 convencional. Essa característica reflete o desempenho superior do motor HCCI nessas condições, onde as emissões específicas de hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio são significativamente menores, indicando um funcionamento mais limpo e eficiente nessas faixas de operação.

Para o caso do CO, a análise revelou que não houve uma diferença significativa entre as duas configurações em termos das regiões de operação. Os mapas de calor mostraram uma distribuição similar dos pontos para ambos os motores, indicando que, no caso do CO, as emissões específicas não foram impactadas de forma expressiva pelas características operacionais distintas do motor HCCI. Esses resultados reforçam que esse motor apresenta vantagens claras nas emissões específicas de HC e NO_x, especialmente em condições de baixa carga e rotação, enquanto mantém um comportamento equivalente ao motor BR10 convencional no que se refere ao CO.

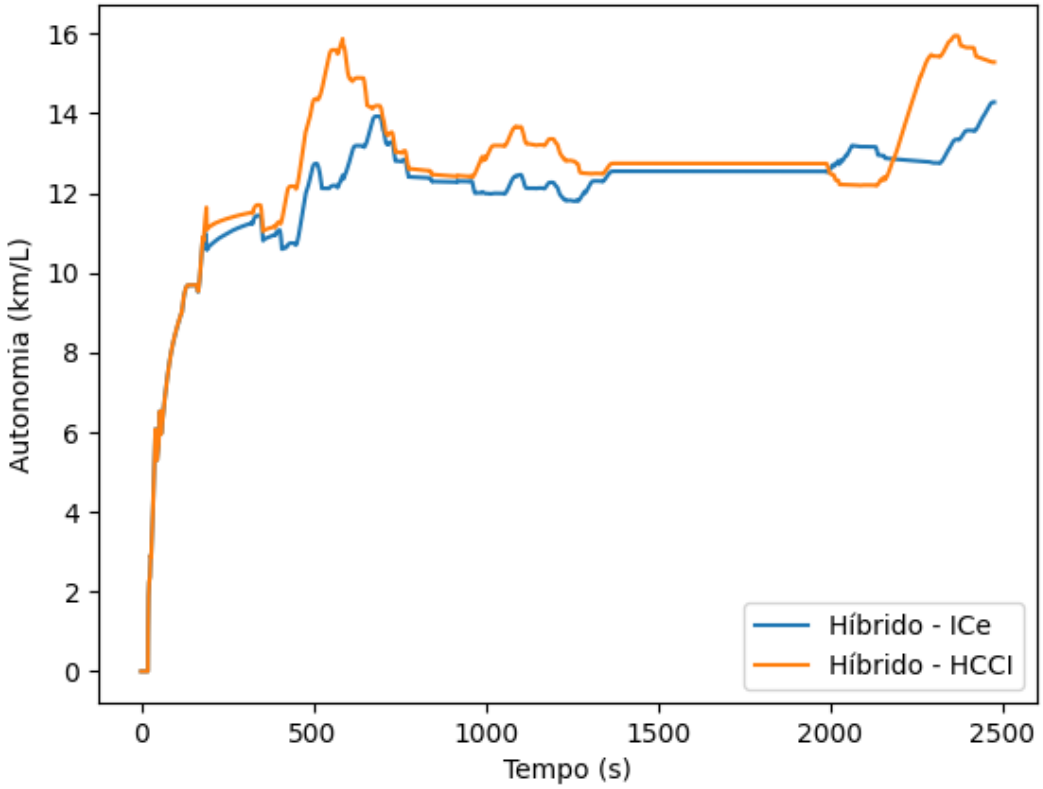
5.5 Veículo híbrido com motores em paralelo

5.5.1 Desempenho dos modelos híbridos

Com o modelo numérico do veículo para ambas as configurações de motor e o modelo numérico do catalisador devidamente validados, a análise prossegue com uma nova configuração de trem de força (*powertrain*), desta vez um sistema híbrido com motores em paralelo, conforme ilustrado na Figura 7. O objetivo desta etapa é comparar o desempenho de duas configurações distintas de motores de combustão interna (MCI): um operando em modo convencional e outro operando em modo HCCI.

Essa comparação visa avaliar como cada tipo de MCI influencia os resultados do ciclo de condução, particularmente em termos de eficiência energética e emissões. A Figura 23 apresenta o consumo do veículo para ambas as configurações durante o ciclo, permitindo uma análise detalhada dos ganhos de eficiência obtidos com o uso da combustão HCCI em relação ao sistema convencional. Além disso, essa análise busca identificar como o sistema híbrido, ao integrar essas diferentes tecnologias de motores, pode otimizar o consumo de combustível e reduzir as emissões, destacando as vantagens e limitações de cada configuração no contexto de um ciclo de condução específico.

Figura 23 – Consumo para as configurações híbridas



Fonte: Autor (2024)

A análise dos resultados apresentados na Figura 23 revela que o sistema híbrido com motor HCCI apresenta um consumo superior em relação ao sistema com motor de combustão interna convencional, quando ambos operam na configuração híbrida. Essa diferença no consumo de combustível pode ser explicada pelo fato de que o controlador foi programado para favorecer a atuação do MCI nas zonas de baixa carga e rotação. Essas condições são especialmente vantajosas para o funcionamento do motor HCCI, uma vez que ele opera de maneira mais eficiente nesses regimes, proporcionando uma queima mais completa do combustível e, consequentemente, um menor consumo de energia.

O motor HCCI, devido às suas características de combustão homogênea e eficiente, tende a ter um desempenho superior em termos de consumo de combustível quando operando em regiões de baixa carga e rotação. Essas zonas normalmente são favorecidas pelo motor elétrico em configurações híbridas, devido a eles possuírem alto torque para rotações mais baixas, contudo, o controlador foi modelado de tal forma que permita o motor de combustão interna atuar nessa região, todavia, o motor BR10 convencional, que não possui as mesmas características

de eficiência em baixas rotações, apresenta um desempenho inferior em termos de consumo. A Tabela 10 fornece informações sobre as emissões ao longo do ciclo para as configurações híbridas.

Tabela 10 – Emissões para as configurações híbridas

	Consumo	Emissão de NO_x	Emissão de HC	Emissão de CO
Convencional	14,28 km/L	14,16 mg/km	13,96 mg/km	138,58 mg/km
HCCI	15,29 km/L	12,90 mg/km	12,99 mg/km	123,48 mg/km
Redução	-7,07%	8,90%	6,95%	11,53%

Fonte: Autor (2024)

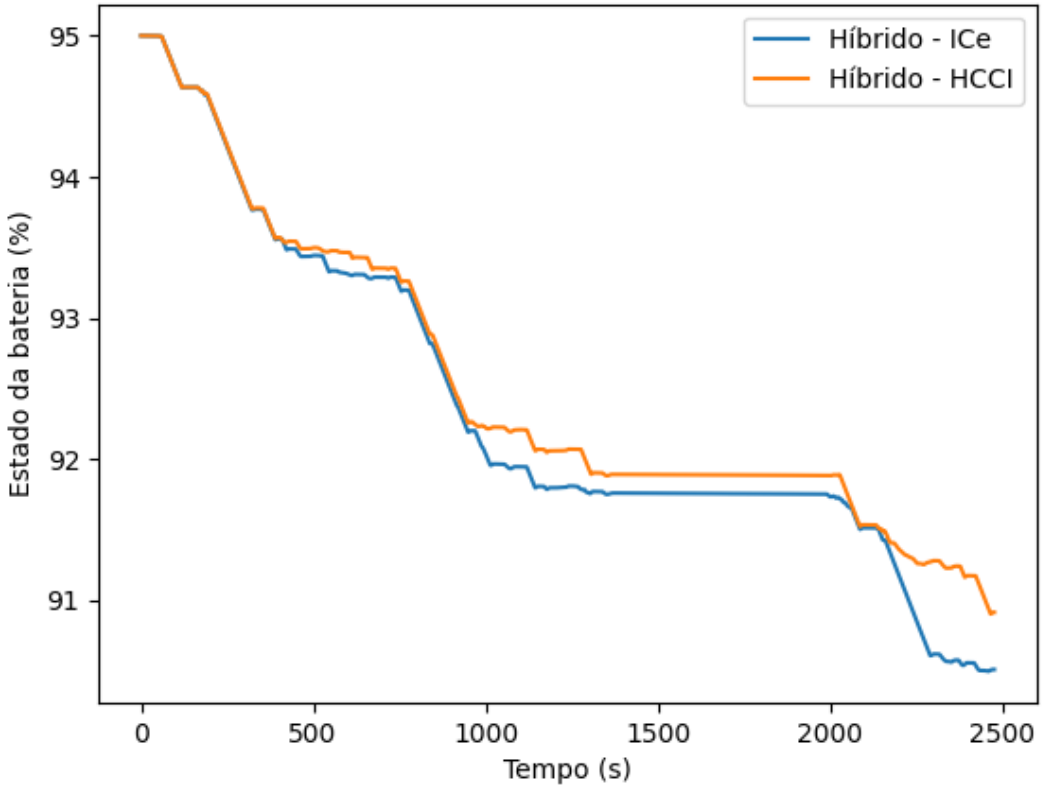
Embora a maior consumo de combustível do sistema HCCI seja evidente, foi possível obter que as emissões de CO e HC apresentaram valores inferiores ao esperado na configuração HCCI, contrastando com o desempenho do modelo com *powertrain* convencional. Esse comportamento atípico pode ser explicado pela interação entre o motor de combustão interna HCCI e o motor elétrico no sistema híbrido. A integração do motor elétrico provavelmente desempenhou um papel crucial na minimização das fases de operação ineficientes do motor HCCI. Durante as fases de aceleração e desaceleração, o motor elétrico pode ter fornecido assistência, reduzindo a carga sobre o motor HCCI e, assim, ajudando a manter uma combustão mais eficiente. Esse efeito foi particularmente notável em condições de baixas velocidades e cargas, nas quais o motor convencional, por sua natureza, apresentaria um desempenho menos eficiente. Portanto, a atuação conjunta dos dois motores no sistema híbrido contribuiu para a redução das emissões, desafiando a expectativa de que o motor HCCI geraria níveis mais altos de CO e HC devido à sua característica de combustão mais pobre.

5.5.2 Estado da bateria para as configurações híbridas

O consumo do veículo híbrido está intrinsecamente relacionado à capacidade de armazenamento de energia da bateria. Portanto, é essencial analisar a condição da bateria após a execução do ciclo de condução para avaliar a influência que ambas configurações de motores exercem sobre o estado de carga. Essa análise permite identificar como o uso das diferentes configurações impactam a eficiência do sistema híbrido e o aproveitamento energético durante o ciclo. Nesse contexto, a Figura 24 apresenta a evolução do estado de carga da bateria ao longo do ciclo de condução para ambas as configurações de motor avaliadas.

A análise do estado de carga da bateria ao longo do ciclo de condução é fundamental

Figura 24 – Estado da bateria para as configurações híbridas



Fonte: Autor (2024)

para compreender o impacto de diferentes configurações de motor no gerenciamento da energia elétrica em sistemas híbridos. Essa avaliação permite identificar como cada motor contribui para a manutenção ou depleção da bateria. Diante disso, a Figura 24 apresenta de forma detalhada as variações no estado de carga da bateria ao longo do ciclo de condução FTP-75. Por meio dessa visualização, é possível observar o comportamento das baterias em resposta às demandas de operação para as configurações avaliadas. Notavelmente, o motor HCCI demonstrou uma menor taxa de descarga da bateria em comparação ao motor BR10 convencional. Durante o ciclo, o estado da bateria atingiu valores próximos de 91% para o motor HCCI, enquanto que para o motor BR10 convencional os valores observados foram ligeiramente inferiores, por volta de 90%.

Esses resultados indicam que o motor HCCI possui uma interação ligeiramente mais eficiente com o sistema híbrido, especialmente no que diz respeito à preservação da carga da bateria. Essa diferença pode estar associada ao funcionamento característico do motor HCCI, que opera de maneira mais eficiente em regiões de baixa carga e rotação, reduzindo a dependência do

motor elétrico para compensar as demandas de propulsão. Por outro lado, a menor eficiência do motor BR10 convencional nessas mesmas condições pode ter exigido maior assistência elétrica, resultando em uma descarga mais acentuada da bateria.

A análise detalhada das variações do estado da bateria evidencia como a escolha da configuração do motor influencia diretamente o gerenciamento energético do veículo híbrido, destacando o potencial do motor HCCI em proporcionar maior eficiência na utilização da bateria ao longo do ciclo de condução. Esses achados reforçam a importância de considerar as características intrínsecas de cada motor no desenvolvimento de estratégias de gestão energética para veículos híbridos.

6 CONCLUSÃO

Os mapas de calibração do motor BR10 foram obtidos experimentalmente e os mapas de sua versão baseada em combustão HCCI foram obtidos por meio da transposição das curvas no motor BR10. Esse processo consistiu principalmente no tratamento e na combinação de dados experimentais, o que facilitou a geração das curvas características necessárias para a modelagem e validação. Com relação ao modelo do veículo convencional da Renault, sua validação foi realizada com sucesso, apresentando um erro relativo inferior a 1%. Esse resultado confirma a fidelidade da simulação em comparação com os dados experimentais, demonstrando que o modelo implementado consegue representar com precisão o comportamento do veículo em condições reais de operação.

O modelo numérico do catalisador desenvolvido foi igualmente validado com êxito, com um erro máximo inferior a 3%, dentro dos limites aceitáveis para esse tipo de simulação. O processo de otimização dos parâmetros do modelo, conduzido com o objetivo de ajustar as constantes do catalisador, resultou em uma maior aproximação entre o modelo numérico e o comportamento observado no sistema real. Esse desempenho sólido na validação demonstra a adequação da abordagem utilizada para modelar o sistema de pós-tratamento de emissões.

A implementação do modelo convencional operando em regime HCCI apresentou resultados coerentes com a literatura técnica, especialmente no que tange às emissões. A configuração HCCI foi eficaz na redução dos poluentes esperados, embora tenha sido observado um aumento nas emissões de CO e um pequeno aumento no HC, característica típica dessa tecnologia de combustão. Portanto, pode-se afirmar que o modelo convencional com tecnologia HCCI foi simulado com sucesso, atendendo aos objetivos de redução de emissões propostos para essa configuração.

O modelo híbrido apresentou resultados surpreendentes e satisfatórios, destacando-se pela redução de todas as emissões analisadas. Esse desempenho pode ser atribuído, em grande parte, ao suporte oferecido pelo motor elétrico nessa configuração. Entre os aspectos mais relevantes dessa etapa do trabalho, destacam-se a melhoria no consumo de combustível, a redução expressiva das emissões e a eficiência no uso da bateria, uma vez que o motor de combustão HCCI conseguiu concluir o ciclo com um estado de carga da bateria superior em comparação ao motor BR10 convencional.

Em conclusão, os resultados alcançados neste trabalho demonstram que o desenvolvimento e a validação dos modelos foram bem sucedidos, apresentando erros mínimos que atestam

a precisão e a confiabilidade dos modelos desenvolvidos. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, tanto na simulação do comportamento veicular quanto na análise das emissões e do consumo de combustível. Esses achados destacam o potencial das metodologias empregadas e reforçam a aplicabilidade das configurações propostas no contexto automotivo, contribuindo significativamente para o avanço na modelagem e análise de sistemas híbridos e de combustão interna.

REFERÊNCIAS

AGENCY, U. S. E. P. **National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)**. n.d. Acesso em: [2023-9-25]. Disponível em: <https://www.epa.gov/naaqs>.

ANSELMA, P. G.; BISWAS, A.; BELINGARDI, G.; EMADI, A. Rapid assessment of the fuel economy capability of parallel and series-parallel hybrid electric vehicles. **Applied Energy**, Elsevier, v. 275, p. 115319, 2020.

ARIOLI, V. T. **Análise de Impactos Técnicos Provocados pela Penetração Massiva de Veículos Elétricos em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2016. 174 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **ABNT NBR IEC 61851-1:2013. Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos**. Brasil: ABNT, 2013. 47 p.

BARAN, R. **A introdução de veículos elétricos no Brasil: avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade**. 139 p. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

Blank, J.; Deb, K. pymoo: Multi-objective optimization in python. **IEEE Access**, v. 8, p. 89497–89509, 2020.

BRADLEY, T. H.; FRANK, A. A. Design, demonstrations and sustainability impact assessments for plug-in hybrid electric vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 115–128, 2009.

Brasil. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil$_0$3$/lei$s

$.DispesobreaPolticaNacionaldoMeioAmbienteedoutrasprovidncias.Disponvelem:$ <>.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 18, de 6 de maio de 1986**. 1986. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores – PROCONVE. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res18.html>.

BRASIL. **Resolução CONAMA N° 297, de 26 de fevereiro de 2002**. 2002. Estabelece os limites para emissões de gases poluentes por ciclomotores, motociclos e veículos similares novos. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/portu/legislacao/lei8978.pdf>.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018**. 2018. Estabelece os padrões nacionais de qualidade do ar. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=740>.

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

CELIK, M. B.; COLAK, A. The use of pure ethanol as alternative fuel in a spark ignition engine. **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, v. 23, n. 3, p. 619–626, 2008.

CERCIELLO, L. A. **Development of a model for NOx formation in combustion**. Tese (Doutorado) — University of Manchester Institute of Science and Technology, 1995.

CHAUDHARI, V.; DESHMUKH, D. Challenges in charge preparation and combustion in homogeneous charge compression ignition engines with biodiesel: A review. **Energy Reports**, Elsevier, v. 5, p. 960–968, 2019.

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**, v. 285, p. 119142, 2021. ISSN 0016-2361.

EPRI - Electric Power Research Institute. **Comparing the benefits and impacts of hybrid electric vehicle options**. Palo Alto, CA, 2001.

GHAREHGHANI, A. Load limits of an hcci engine fueled with natural gas, ethanol, and methanol. **Fuel**, v. 239, p. 1001–1014, 2019. ISSN 0016-2361. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623611831963X>.

GHAREHGHANI, A.; ABBASI, H. R.; ALIZADEH, P. Application of machine learning tools for constrained multi-objective optimization of an hcci engine. **Energy**, v. 233, p. 121106, 2021. ISSN 0360-5442.

GLARBORG, P.; MILLER, J. A.; RUSCIC, B.; KLIPPENSTEIN, S. J. Modeling nitrogen chemistry in combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 67, p. 31–68, 2018. ISSN 0360-1285. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128517301600>.

GLYNIADAKIS, S.; BALESTIERI, J. A. P. Brazilian light vehicle fleet decarbonization scenarios for 2050. **Energy Policy**, v. 181, p. 113682, 2023. ISSN 0301-4215. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421523002677>.

HEYWOOD, J. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 2nd. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.

International Energy Agency. **CO2 Emissions from Fuel Combustion**. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-2022>.

International Energy Agency. **Global EV Outlook 2023: Accelerating ambitions despite the headwinds**. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>.

KHOURY, J. A.; NADER, W. B. Design and simulation of turbogenerators for series hybrid electric vehicles. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 236, p. 114078, 2021.

MAURYA, R. K.; AGARWAL, A. K. Experimental study of combustion and emission characteristics of ethanol fuelled port injected homogeneous charge compression ignition (hcci) combustion engine. **Applied Energy**, v. 88, p. 1169–1180, 2011.

MCLAREN, J.; MILLER, J.; WOOD, E.; SHAPIRO, E.; OSHAUGHNESSY, E. Other, **Emissions Associated with Electric Vehicle Charging: Impact of Electricity Generation Mix, Charging Infrastructure Availability, and Vehicle Type**. 2016.

NOGUEIRA, G. P.; PETRIELLI, G. P.; CHAGAS, M. F.; de Souza Henzler, D.; de Mesquita Sampaio, I. L.; BONOMI, A. M.; JUNQUEIRA, T. L.; de Morais, E. R.; HERNANDES, T. A. D. Supplying the ethanol demand for 2030 in brazil as a land-based climate change mitigation alternative: Implications on greenhouse gases emissions. **Science of The Total Environment**, v. 951, p. 175782, 2024. ISSN 0048-9697. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724059382>.

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. **SAE Transactions**, JSTOR, p. 1851–1860, 1979.

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

SHARMA, T. K.; RAO, G. A. P.; MURTHY, K. M. Homogeneous charge compression ignition (hcci) engines: A review. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 11, n. 6, p. 47–67, 2015.

SHIRVANI, S.; SHIRVANI, S.; SHAMEKHI, A. H.; REITZ, R.; SALEHI, F. Meeting euro6 emission regulations by multi-objective optimization of the injection strategy of two direct injectors in a ddfs engine. **Energy**, v. 229, p. 120737, 2021. ISSN 0360-5442.

SODRE, J. R. Modelling nox emissions from spark-ignition engines. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, v. 214, n. 8, p. 929–934, 2000.

TIE, S. F.; TAN, C. W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 82–102, 2013.

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.

World Health Organization. **Ambient air pollution: Health impacts**. 2018. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health>.

World Health Organization. **Global air quality guidelines**. 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.

YAO, Y.-C.; TSAI, J.-H.; WANG, I.-T. Emissions of gaseous pollutant from motorcycle powered by ethanol–gasoline blend. **Applied energy**, Elsevier, v. 102, p. 93–100, 2013.

YONG, J. Y.; RAMACHANDARAMURTHY, V. K.; TAN, K. M.; MITHULANANTHAN, N. A review on the state-of-the-art Technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 365–385, 2015.

ZHANG, H.; LIU, S.; LEI, N.; FAN, Q.; WANG, Z. Leveraging the benefits of ethanol-fueled advanced combustion and supervisory control optimization in hybrid biofuel-electric vehicles. **Applied Energy**, v. 326, p. 120033, 2022. ISSN 0306-2619. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922012909>.

ZHAO, H. **HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2007.

ÇELEBI, S.; KOCAKULAK, T.; DEMIR, U.; ERGEN, G.; YILMAZ, E. Optimizing the effect of a mixture of light naphtha, diesel and gasoline fuels on engine performance and emission values on an hcci engine. **Applied Energy**, 2023.

APÊNDICE A – CÓDIGOS-FONTES UTILIZADOS

Código-fonte 1 – Função objetivo utilizada para otimização de parâmetros com algorítmo genético

```
1
2  import os
3  import pandas as pd
4  import numpy as np
5  import matplotlib.pyplot as plt
6  from scipy.interpolate import interp1d
7  from pymoo.algorithms.moo.nsga2 import NSGA2
8  from pymoo.core.problem import ElementwiseProblem
9  from pymoo.algorithms.soo.nonconvex.ga import GA
10 from pymoo.optimize import minimize
11 from pymoo.operators.selection.tournament import TournamentSelection
12 from pymoo.termination.default import
       DefaultSingleObjectiveTermination
13 from pymoo.operators.sampling.lhs import LHS
14 from pymoo.operators.crossover.sbx import SBX
15 from pymoo.operators.mutation.pm import PM
16 from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
17 from sklearn.metrics import r2_score
18
19 generation=100
20 population_size=20
21 new_population=10
22 counter_g, counter_d= 1, 1
23
24
25 def genealogy(i, j, x, f):
26         string=str(i)+'     '+str(j)+'     '
27         for k in range(len(x)):
28             string=string+str(x[k])+'     '
29         string=string+str(f)+'\n'
30         with open('family', 'a') as f:
31                 f.write(string)
32
33 def counter():
```

```
        global counter_d, counter_g, population_size, new_population
        os.system('mkdir evolution/generation_'+str(counter_g)+'/
            design_'+str(counter_d))
        os.system('cp graphic.png evolution/generation_'+str(
            counter_g)+'/design_'+str(counter_d))

        if(counter_d<=population_size and counter_g==1):
                counter_d+=1
                if(counter_d>population_size):
                        counter_g+=1
                        counter_d=1
        elif(counter_g!=1):
                counter_d+=1
                if(counter_d>new_population):
                        counter_g+=1
                        counter_d=1

realis=pd.read_csv('realis.txt',sep=r"\s+", engine = "python",header
    =1)
realis=realis.values
lines_realis=int(np.size(realis)/7)

temperature=pd.read_csv('temperature.txt',sep=r"\s+", engine = "
    python",header=None)

eta_catalyzer=pd.read_csv('eff_catalyzer.txt',sep=r"\s+", engine = "
    python",header=None)
eta_catalyzer=eta_catalyzer.values

eta_catalyzer[:,2]=eta_catalyzer[:,2]-0.02*100
eta_catalyzer[:,3]=eta_catalyzer[:,3]-0.035*100

eta_catalyzer[:,2]=np.clip(eta_catalyzer[:,2],0.29,None)
eta_catalyzer[:,3]=np.clip(eta_catalyzer[:,3],0.28,None)

dados=pd.read_csv('HSw29_SV6958_C1_230906_000FTP.csv', engine = "
    python",header=2)
dados=dados.values

```

```
temperature_catalyzer=interp1d(dados[:,0]-224,dados[:,2])
real_temperature=temperature_catalyzer(realis[:,0])+273

maedinah=RandomForestRegressor(random_state=5)
maedinah.fit(temperature.iloc[:,[0,2]],temperature.iloc[:,1])

eff_co=interp1d(eta_catalyzer[:,0],eta_catalyzer[:,2])
eff_hc=interp1d(eta_catalyzer[:,0],eta_catalyzer[:,3])
eff_nox=interp1d(eta_catalyzer[:,0],eta_catalyzer[:,1])

class merit(ElementwiseProblem):

    def __init__(self):
        super().__init__(n_var=2,
                         n_obj=1,
                         n_ieq_constr=0,
                         xl=np.array([1e-5,1e-6]),
                         xu=np.array([1e-4,1e-4]),
                         vtype=float)

    def _evaluate(self, x, out, *args, **kwargs):
        global counter_d, counter_g
        T_amb=298
        PCI_co=10100.0e3
        PCI_hc=55500.0e3
        condutividade=0.06
        viscosidade=1e-3
        AFS=9


        dt=realis[1,0]-realis[0,0]

        T_cat=np.zeros(lines_realis)
        T_exaust=np.zeros(lines_realis)

        #Mapa de temperatura
        for k in range(lines_realis):
            T_exaust[k] = maedinah.predict([[realis[k,3],realis[k
                ,4]]])
```

```
105
106         m=realis[:,6]*(AFS+1)
107         h=(3.66*m*condutividade)/viscosidade
108         T_cat[0]=T_amb
109         DT_exaust = np.zeros(lines_realis)
110         DT_oxid =   np.zeros(lines_realis)
111         DT_resfr = np.zeros(lines_realis)
112         ox = np.zeros(lines_realis)
113         eta_nox = np.zeros(lines_realis)
114
115         x2=0.0005062347445879651 #Constante de resfriamento obtida
               por otimiza  o
116
117         try:
118             ox[0]=PCI_co*realis[0,1]*eff_co(T_amb-273)*1e-2+PCI_hc*
                   realis[0,2]*eff_hc(T_amb-273)*1e-2
119         except:
120             if(T_amb-273>eta_catalyzer[-1,0]):
121                 ox[0]=PCI_co*realis[0,1]*eff_co(eta_catalyzer[-1,0])
                       *1e-2+PCI_hc*realis[0,2]*eff_hc(eta_catalyzer
                       [-1,0])*1e-2
122             else:
123                 ox[0]=PCI_co*realis[0,1]*eff_co(eta_catalyzer[0,0])
                       *1e-2+PCI_hc*realis[0,2]*eff_hc(eta_catalyzer
                       [0,0])*1e-2
124
125         for i in range(lines_realis-1):
126             DT_exaust[i] =  x[0]*h[i]*(T_exaust[i]-T_cat[i])*dt#*1e
                   -3
127             DT_oxid[i] =    x[1]*ox[i]*dt#*1e-8
128             DT_resfr[i] =   x2*(T_cat[i]-T_amb)*dt
129             T_cat[i+1]=DT_exaust[i]+DT_oxid[i]-DT_resfr[i]+T_cat[i]
130
131             try:
132                 ox[i+1]=PCI_co*realis[i,1]*eff_co(T_cat[i+1]-273)*1e
                       -2+PCI_hc*realis[i+1,2]*eff_hc(T_cat[i+1]-273)*1e
                       -2
133             except:
134                 if(T_cat[i+1]-273>eta_catalyzer[-1,0]):
```

```
                    ox[i+1]=PCI_co*realis[i+1,1]*eff_co(eta_catalyzer[-1,0])*1e-2+PCI_hc*realis[i+1,2]*eff_hc(eta_catalyzer[-1,0])*1e-2
                else:
                    ox[i+1]=PCI_co*realis[i+1,1]*eff_co(eta_catalyzer[0,0])*1e-2+PCI_hc*realis[i+1,2]*eff_hc(eta_catalyzer[0,0])*1e-2

        for i in range(lines_realis):
            try:
                eta_nox[i]=eff_nox(T_cat[i]-273)*1e-2
            except:
                if(T_cat[i]-273>eta_catalyzer[-1,0]):
                    eta_nox[i]=eff_nox(eta_catalyzer[-1,0])*1e-2
                else:
                    eta_nox[i]=eff_nox(eta_catalyzer[0,0])*1e-2


        RMSE=100*np.sqrt((((T_cat-np.array(real_temperature))*(1-eta_nox))**2).mean())/np.array(real_temperature).mean()
        R2=r2_score(real_temperature,T_cat)

        func1=interp1d(realis[:,0],T_cat)

        time=np.linspace(1250,2000,1000)

        temp1=func1(time)
        temp2=np.array(temperature_catalyzer(time))+273

        # RMSE=100*np.sqrt((((temp1-temp2))**2).mean())/temp2.mean()

        x0="{:.8e}".format(x[0])
        x1="{:.8e}".format(x[1])
        x2="{:.8e}".format(x2)

        plt.grid(True)
        fig = plt.gcf()
        plt.plot(realis[:,0],real_temperature,label="Real",color="green")
```

```
        plt.plot(realis[:,0],T_cat,label="Calculado",color="blue")
        # plt.plot(realis[:,0],T_exaust,label="Escape",color="red")
        plt.xlabel("Tempo (s)")
        plt.ylabel("Temperatura (K)")
        # plt.title("RMSE*(1 - efici ncia) = "+str(round(RMSE,8))
            +"%\nx$_0$ = "+x0)
        plt.title("RMSE*(1 - efici ncia) = "+str(round(RMSE,8))+"%\
            nx$_0$ = "+x0+", x$_1$ = "+x1+", x$_2$ = "+x2)
        plt.legend()
        fig.savefig('graphic.png', format='png')
        plt.clf()

        genealogy(counter_g, counter_d, x, RMSE)
        counter()
        out["F"] = RMSE
```

APÊNDICE B – RELATÓRIO DE OTIMIZAÇÃO

generation	*design*	X_1	X_2	F_1
1	1	7,64758101775499E-05	9,92802520108524E-05	1,21485012463421
1	2	4,05845477903346E-05	4,60632033438202E-05	1,17312681201724
1	3	8,70710752977866E-05	2,72335672837144E-05	0,743731331379076
1	4	4,38827604573151E-05	8,60056767884552E-05	1,7475901098684
1	5	7,97687812131166E-05	3,38507310177397E-05	0,783291427140688
1	6	2,22597860375761E-05	6,07725329729851E-05	2,47283275713315
1	7	7,12585484458467E-05	1,34102396765150E-05	0,795244235336475
1	8	9,88550285395851E-05	5,10694157317516E-05	0,76532702527474
1	9	2,62753144443762E-05	9,35770051591963E-05	3,12862811821491
1	10	8,32708226701236E-05	9,95519378129708E-06	0,766248677938636
1	11	3,19681331679383E-05	1,80686097804311E-06	1,09358773930687
1	12	5,61513883538371E-05	3,76769232891468E-05	0,902823828138874
1	13	4,94069879126581E-05	7,71149266313215E-05	1,44036380715672
1	14	6,56274010566647E-05	5,87785312516440E-05	0,98465529450336
1	15	3,66962979561961E-05	7,08913339420566E-05	1,80747003968544
1	16	6,19301947101659E-05	6,65188300455712E-05	1,09254924386482
1	17	1,33575012057577E-05	8,22226334477758E-05	5,29854642656677
1	18	9,35704217784304E-05	4,36586018193818E-05	0,757722169072353
1	19	5,44297897726889E-05	1,95908800171156E-05	0,832513394533648
1	20	1,86429628766876E-05	2,42508513916480E-05	1,61189349232812
2	1	9,90096835345174E-05	1,85836074582664E-05	0,741426194576415
2	2	3,19681331679383E-05	7,49393662522714E-06	1,07898590939807
2	3	8,53239289969488E-05	2,71908205980551E-05	0,74699426194844
2	4	8,33503203187802E-05	9,95519378129708E-06	0,765941566470665
2	5	7,97687812131166E-05	3,35195670087479E-05	0,78264500339651
2	6	5,44297897726889E-05	4,05424771724080E-05	0,935670774632701
2	7	7,62517876316226E-05	9,37497657352798E-05	1,16816042084746
2	8	7,42694426960196E-05	8,45249568034958E-06	0,799112901547199

2	9	9,34909241297738E-05	4,36586018193818E-05	0,757858331887523
2	10	1,86429628766876E-05	2,45820154006398E-05	1,62059864424996
3	1	3,73786076556547E-05	1,80686097804311E-06	1,03053479615661
3	2	9,38548500710249E-05	5,17075666246719E-05	0,778156043674867
3	3	8,33503203187802E-05	1,02861971632271E-05	0,765272864686849
3	4	7,81107900193319E-05	3,38507310177397E-05	0,789007974405274
3	5	9,42507568530894E-05	4,36586018193818E-05	0,756571223329024
3	6	7,83039039945342E-05	3,35195670087479E-05	0,787627371644278
3	7	9,90096835345174E-05	1,82526040763365E-05	0,741803934455678
3	8	8,99385321092628E-05	2,72335672837144E-05	0,741561621717344
3	9	7,97687812131166E-05	9,91734753220917E-06	0,783409563416691
3	10	8,33503203187802E-05	3,91669052697209E-05	0,772510327690406
4	1	9,42382679077851E-05	3,88659064189789E-05	0,747942522325407
4	2	8,33503203187802E-05	6,64286642093009E-06	0,773530829970991
4	3	9,55566878921835E-05	1,72618725427738E-05	0,743967774283212
4	4	8,27313538263838E-05	6,03258871056776E-06	0,777649408950185
4	5	8,39906896069116E-05	2,57472195431978E-05	0,750350673029718
4	6	8,99510210545671E-05	2,73946192846826E-05	0,741598193803368
4	7	8,03176650126635E-05	4,29750562284858E-05	0,805530595602675
4	8	9,90096835345174E-05	1,80578943955736E-05	0,74203189472217
4	9	9,95645649454066E-05	4,60994406742782E-05	0,752911497057628
4	10	7,45211890735419E-05	3,35195670087479E-05	0,802085639931548
5	1	8,23708985217492E-05	2,57222665879014E-05	0,757699201602996
5	2	8,13263855385720E-05	2,71908205980551E-05	0,765650933972235
5	3	9,35795099595630E-05	1,79379497196477E-05	0,743786634338677
5	4	9,11053172499740E-05	2,86895001350719E-05	0,74119866727374
5	5	9,97031599505641E-05	1,82526040763365E-05	0,74161156997297
5	6	8,32944470940049E-05	2,72585202390108E-05	0,753984408778077
5	7	9,95609175670900E-05	1,80578943955736E-05	0,741880587646642
5	8	9,55475997110509E-05	4,29825246425079E-05	0,753130516494309
5	9	9,96098994229131E-05	1,96576664416746E-05	0,74010305100392

5	10	8,07976081886200E-05	1,02861971632271E-05	0,779836366378771
6	1	8,99288996361201E-05	2,73946192846826E-05	0,741614119249828
6	2	9,11053172499740E-05	1,86788104716993E-05	0,743866208624281
6	3	8,62321217018663E-05	1,95879075130407E-05	0,745748779832239
6	4	9,82623212098254E-05	1,72648907881047E-05	0,743204925970456
6	5	9,36016313780100E-05	1,64999643311757E-05	0,745481124849135
6	6	9,78956841163271E-05	2,61856119297772E-05	0,736736825996917
6	7	8,68692485724977E-05	2,73033262123484E-05	0,744032743540765
6	8	8,71193960388829E-05	2,71908205980551E-05	0,743652504661627
6	9	9,55566878921835E-05	1,70198412620750E-05	0,744265186504899
6	10	9,96201889567786E-05	1,87294462459041E-05	0,741089013923299
7	1	8,85287132625854E-05	2,86895001350719E-05	0,743246071686355
7	2	9,78956841163271E-05	2,73784677491749E-05	0,736564499577896
7	3	9,89901918927858E-05	1,78654808295528E-05	0,742266671106505
7	4	9,53435730080835E-05	1,80578943955736E-05	0,743104398031417
7	5	9,35795099595630E-05	1,92556383577453E-05	0,74245642311946
7	6	9,94582213480801E-05	1,37319508342371E-05	0,748087425368163
7	7	8,99510210545671E-05	2,30181032433960E-05	0,741637709890277
7	8	9,99681378678251E-05	1,97181187824874E-05	0,739933784561457
7	9	9,95026189353891E-05	2,71908205980551E-05	0,735722226690332
7	10	8,73030029352421E-05	1,82526040763365E-05	0,745667401006888
8	1	9,79306443359481E-05	1,77566638586539E-05	0,742692693025997
8	2	9,77922495663548E-05	1,84386034885189E-05	0,741943560236728
8	3	9,94231091676182E-05	2,00693959917869E-05	0,73975336253165
8	4	9,04762820344781E-05	2,04957458339523E-05	0,742641114109377
8	5	9,95749391876935E-05	2,20313006778340E-05	0,73802569409851
8	6	9,14288728824720E-05	2,72335672837144E-05	0,74052734734998
8	7	9,99896746383509E-05	1,27983295109334E-05	0,749574536115718
8	8	9,89875960062076E-05	2,32321699289320E-05	0,737441440763523
8	9	9,96408387150351E-05	2,29572849181379E-05	0,737358179721279
8	10	9,99681378678251E-05	1,89051280114745E-05	0,740794805576761

9	1	9,18344257314257E-05	1,89278564609835E-05	0,743374143451449
9	2	9,95060094872408E-05	1,96576664416746E-05	0,740134466870202
9	3	9,51180891871245E-05	2,55435288238835E-05	0,738311752716205
9	4	9,91930545260620E-05	2,44979311412821E-05	0,736693229166748
9	5	9,96408387150351E-05	1,98506923395050E-05	0,739900032976746
9	6	9,79131276340733E-05	3,00591355025913E-05	0,736776607400418
9	7	9,49572782307792E-05	2,79490738898743E-05	0,738325078299955
9	8	9,78938252226770E-05	2,61921542639657E-05	0,736736374167458
9	9	9,95026189353891E-05	2,71995175953715E-05	0,735720858842836
9	10	9,82860069132482E-05	2,66777425759815E-05	0,73644009454043
10	1	9,96441766381207E-05	2,00693959917869E-05	0,739684591632153
10	2	9,68894219856416E-05	2,55435288238835E-05	0,737396946036362
10	3	9,99681378678251E-05	2,63432048773421E-05	0,735670949923453
10	4	9,79133478689016E-05	2,74367236299037E-05	0,73655050409959
10	5	9,79609807148590E-05	2,16251477188509E-05	0,738912329078529
10	6	9,83975981305403E-05	2,17828751227965E-05	0,738634824845438
10	7	9,78706548286093E-05	2,61921542639657E-05	0,736748218868752
10	8	9,78954638814989E-05	3,00008796218626E-05	0,736774607507588
10	9	9,93551106821419E-05	2,75880465393758E-05	0,735747539465434
10	10	9,88948968993645E-05	2,61921542639657E-05	0,736232961714765
11	1	9,94765748150805E-05	2,99978146720849E-05	0,735745404000926
11	2	9,90740829034732E-05	2,31085204552875E-05	0,737481890138986
11	3	9,89103691230856E-05	2,70627350830602E-05	0,736050778456287
11	4	9,96117675536156E-05	2,71844903182589E-05	0,735666654290865
11	5	9,79215080014906E-05	2,72025825451491E-05	0,736565197785648
11	6	9,88627631177047E-05	2,66777425759815E-05	0,736141454031305
11	7	9,99232813607884E-05	2,66229275574831E-05	0,735621724744224
11	8	9,98982714625601E-05	2,29591985032355E-05	0,737259293397331
11	9	9,93530558604370E-05	2,70293932749568E-05	0,735826132973813
11	10	9,74325076869862E-05	2,55648739354747E-05	0,737120444689783
12	1	9,67085654946622E-05	2,65939972338212E-05	0,737294963231505

12	2	9,99612388968849E-05	3,16106319019474E-05	0,735818339138456
12	3	9,57762102482502E-05	2,74379796235051E-05	0,737784687565358
12	4	9,70314298115881E-05	2,71608627727042E-05	0,737063353981743
12	5	9,99232813607884E-05	2,52232318519761E-05	0,736064950171952
12	6	9,99435938658755E-05	2,21510328153079E-05	0,737805201791124
12	7	9,96117675536156E-05	2,71677286086722E-05	0,735669394796157
12	8	9,94931393579841E-05	3,25901977054377E-05	0,736540457754466
12	9	9,71858520301239E-05	2,29115581870622E-05	0,738357520694507
12	10	9,94528765100712E-05	1,92501742944596E-05	0,740571582326946
13	1	9,96104417345292E-05	2,71677286086722E-05	0,735670080098711
13	2	9,99648079998241E-05	3,49341021860985E-05	0,737559532067049
13	3	9,90089869014810E-05	2,62012481182220E-05	0,73617463767537
13	4	9,99382400859960E-05	2,82537180354632E-05	0,735376534619762
13	5	9,98075473078279E-05	1,79931361184176E-05	0,741891064551031
13	6	9,93966272370064E-05	1,39217954364155E-05	0,747787016311702
13	7	9,69257258168158E-05	2,52232318519761E-05	0,737466564397779
13	8	9,97937120658507E-05	3,37081069963272E-05	0,736920472820288
13	9	9,42124311261408E-05	2,55315744445211E-05	0,738801056926912
13	10	9,99327957779671E-05	2,72029813695955E-05	0,735498083158397
14	1	9,99371039404469E-05	2,67108122437728E-05	0,735594433533706
14	2	9,99921162225737E-05	3,77662203253778E-05	0,739967192417133
14	3	9,94419308516179E-05	2,71908205980551E-05	0,735753773752522
14	4	9,99327957779671E-05	2,77071328229207E-05	0,73542561478417
14	5	9,57590149905477E-05	2,51577990853123E-05	0,738065582050309
14	6	9,96115778574482E-05	2,71666847062163E-05	0,735669664573192
14	7	9,96117675536156E-05	2,62006787668173E-05	0,735881645757086
14	8	9,94988280171997E-05	2,49739704231694E-05	0,736353804555933
14	9	9,95026189353891E-05	2,72028986436566E-05	0,735720329407251
14	10	9,99238712096355E-05	2,75880465393758E-05	0,735444848029316
15	1	9,99091000733677E-05	2,71844903182589E-05	0,73551344175075
15	2	9,93551106821419E-05	2,75780584074931E-05	0,735748612169406

15	3	9,99773052713716E-05	2,66229275574831E-05	0,735595129418516
15	4	9,96115744156506E-05	2,71666847062163E-05	0,735669666352065
15	5	9,99382400859960E-05	2,82637061673459E-05	0,735376005268978
15	6	9,94339244262120E-05	2,73260675235916E-05	0,73573799186061
15	7	9,96104451763268E-05	2,71677286086722E-05	0,735670078319646
15	8	9,94763070802374E-05	3,00051760585596E-05	0,73574678148906
15	9	9,99461495271714E-05	2,56324436872090E-05	0,735901982949882
15	10	9,94421985864610E-05	2,71834592115804E-05	0,735754782439087
16	1	9,94164550492984E-05	2,71844903182589E-05	0,735768013891042
16	2	9,80831128583713E-05	2,71669725675914E-05	0,736480395093718
16	3	9,99327957779671E-05	2,48503435570757E-05	0,736216236677723
16	4	9,99272703262125E-05	2,75972222007547E-05	0,735441879800201
16	5	9,95037163666465E-05	2,44381089228481E-05	0,73658791127676
16	6	9,99744058773276E-05	2,66226396961079E-05	0,735596624621563
16	7	9,99922313381695E-05	3,33308381926657E-05	0,736557900828769
16	8	9,91203476604524E-05	2,71775951190131E-05	0,735923774654209
16	9	9,96070460549728E-05	2,71585529472934E-05	0,735673347557803
16	10	9,69128952343102E-05	3,47812798008903E-05	0,740145958408503
17	1	9,99743934598185E-05	2,66226384120153E-05	0,735596631037623
17	2	9,99238712096355E-05	3,60632031110436E-05	0,738460767739976
17	3	9,48767362371136E-05	2,71844903182589E-05	0,738318312398695
17	4	9,99086641722463E-05	2,71796608471681E-05	0,73551450452083
17	5	9,42697227162682E-05	2,66229288415757E-05	0,738677059985799
17	6	9,99850532058433E-05	2,75834561994539E-05	0,735413184353138
17	7	9,99327957779671E-05	3,09402886559071E-05	0,735644683196898
17	8	9,99382400859960E-05	3,14627081829440E-05	0,735787317751197
17	9	9,97347655983964E-05	2,71030063006872E-05	0,735617107379169
17	10	9,99520659105333E-05	3,42145150228658E-05	0,737094268327365
18	1	9,99744058773276E-05	2,67107805762934E-05	0,735575964187952
18	2	9,99327957779671E-05	2,84448261235038E-05	0,735371416909953
18	3	9,99743934598185E-05	2,66313340025286E-05	0,735594553741886

18	4	9,99382400859960E-05	3,17005690669908E-05	0,735864127572843
18	5	9,99734880422039E-05	2,45886130804665E-05	0,73631747773805
18	6	9,88006916428245E-05	2,82045963227868E-05	0,736016778914575
18	7	9,96117675536156E-05	2,80469517280800E-05	0,73556881340096
18	8	9,99850532058433E-05	2,43844934684474E-05	0,736410695600869
18	9	9,34565316052285E-05	2,70978102213126E-05	0,739187207724948
18	10	9,83508656535256E-05	2,33378698106248E-05	0,737636858095386
19	1	9,99585227740824E-05	2,81017004109702E-05	0,735374890920708
19	2	9,99841776886142E-05	2,75967899569499E-05	0,73541190700839
19	3	9,90488112669893E-05	2,39534509814106E-05	0,737017681584901
19	4	9,99989719906772E-05	2,19797779797925E-05	0,73791443611648
19	5	9,78236842730461E-05	2,66176079327408E-05	0,736693060501303
19	6	9,85463047885967E-05	3,25006002475984E-05	0,737218831547738
19	7	9,99612904050678E-05	2,77071328229207E-05	0,735410457260273
19	8	9,81177797160498E-05	2,67307026324001E-05	0,736519714777127
19	9	9,99238712096355E-05	2,75681875158478E-05	0,735447419451522
19	10	9,99836501588828E-05	2,71063491023302E-05	0,735489346828256
20	1	9,99327957779671E-05	2,84434160607375E-05	0,735371461747424
20	2	9,99714188322304E-05	2,81017004109702E-05	0,735367840559673
20	3	9,99238712096355E-05	2,75881496555004E-05	0,735444834793939
20	4	9,76303451790242E-05	2,82260952549393E-05	0,736701298437293
20	5	9,99611274289530E-05	2,77071328229207E-05	0,735410543918746
20	6	9,99611818969436E-05	2,93151970235475E-05	0,735369786712412
20	7	9,99272703262125E-05	2,75971190846301E-05	0,735441892942833
20	8	9,78676265299147E-05	3,24439672303444E-05	0,737719725392383
20	9	9,99594592173640E-05	2,75681875158478E-05	0,735428671473194
20	10	9,97319435051642E-05	2,81102507285270E-05	0,73549866394416
21	1	9,99614363126310E-05	2,82612948824327E-05	0,735363301503508
21	2	9,99329088553432E-05	2,94995208742797E-05	0,735400856014495
21	3	9,99863108999387E-05	2,84448261235038E-05	0,73534144051999
21	4	9,99379312023180E-05	2,77095441078338E-05	0,735422604145713

21	5	9,99530322689514E-05	3,03152550158670E-05	0,735497188333894
21	6	9,99610688195674E-05	2,77071328229207E-05	0,735410575082921
21	7	9,54765350478959E-05	2,75681875158478E-05	0,737969869082766
21	8	9,98529047653084E-05	2,74259133522486E-05	0,735504213331983
21	9	9,99850532058433E-05	3,01394923683400E-05	0,735447293704143
21	10	9,99611818969436E-05	3,01752883582939E-05	0,735468081761201
22	1	9,99865930344347E-05	2,77036868937440E-05	0,735397412869857
22	2	9,99586985391100E-05	3,30910199621027E-05	0,736462119844211
22	3	9,99989624562393E-05	2,86515010709462E-05	0,735329682632708
22	4	9,99327558559298E-05	2,84600213943145E-05	0,735370970412581
22	5	9,99353643507599E-05	2,95111005263765E-05	0,735400396306073
22	6	9,99545791168510E-05	2,77734359942653E-05	0,735406581072944
22	7	9,71719742836486E-05	2,80998058349311E-05	0,736970283425737
22	8	9,99856815660300E-05	2,84448261235038E-05	0,735341792767512
22	9	9,99379711243552E-05	2,77836355872386E-05	0,735414362641456
22	10	9,99572290179776E-05	2,82612948824327E-05	0,735365628038767
23	1	9,83882609745133E-05	2,88521548385373E-05	0,73628099907498
23	2	9,99327558559298E-05	3,30957442699022E-05	0,736484335667729
23	3	9,99989851986952E-05	2,81214583313340E-05	0,735351356285137
23	4	9,99864462190079E-05	1,97780777503811E-05	0,739867657852721
23	5	9,99824243013683E-05	2,94060063348064E-05	0,735363496057402
23	6	9,72855894146291E-05	3,03865198957875E-05	0,737296374935279
23	7	9,99382400859960E-05	2,33716683053173E-05	0,736985154881394
23	8	9,99870912972385E-05	3,43547576360227E-05	0,737153475068972
23	9	9,99322403379908E-05	2,84448261235038E-05	0,735371728284737
23	10	9,99337429298070E-05	3,35473807579076E-05	0,736719223396043
24	1	9,74415468652235E-05	2,84448261235038E-05	0,736826730219824
24	2	9,99548055218573E-05	2,63460059985426E-05	0,735676623939836
24	3	9,94787904376148E-05	3,68982099672838E-05	0,739626965255115
24	4	9,88097843083117E-05	2,72347376257511E-05	0,736080021815485
24	5	9,99824927415271E-05	2,94046103841980E-05	0,735363350467607

24	6	9,99568266930194E-05	2,82657295154201E-05	0,735365614705016
24	7	9,99322403379908E-05	2,80425346662897E-05	0,735393639418222
24	8	9,99616273822468E-05	2,86522693664105E-05	0,735350880558448
24	9	9,99327273378064E-05	2,84448120113459E-05	0,735371455724223
24	10	9,73411305345726E-05	2,71311723305495E-05	0,736892273359537
25	1	9,99335344077377E-05	2,84448264249162E-05	0,735371002838849
25	2	9,99572359853043E-05	2,81017004109702E-05	0,735375594562022
25	3	9,99939083679270E-05	2,86522693664105E-05	0,735332543613587
25	4	9,99327558559298E-05	2,75682828420916E-05	0,735442724677634
25	5	9,99986595224394E-05	2,82612948824327E-05	0,735342730380299
25	6	9,99855038298803E-05	2,84448117099335E-05	0,735341892737283
25	7	9,99585158067558E-05	2,82612948824327E-05	0,735364916444428
25	8	8,46103568526739E-05	2,61842365713853E-05	0,748497917919016
25	9	9,99617219093339E-05	2,64490870507363E-05	0,735646035221604
25	10	9,99824088300117E-05	2,31415776533734E-05	0,737110402949586
26	1	9,99656246166027E-05	3,14911910540492E-05	0,735777285385329
26	2	9,99568266930194E-05	2,82703595564117E-05	0,735365370862938
26	3	9,99824243013683E-05	2,64257205757370E-05	0,73564206551813
26	4	9,99614363126310E-05	2,47413009136592E-05	0,736252373447629
26	5	9,99991700258534E-05	2,81214583313340E-05	0,735351255198534
26	6	9,98786622157389E-05	2,90627428799433E-05	0,735405138436956
26	7	9,99856815660300E-05	2,84401960825122E-05	0,735341950458397
26	8	9,99863108999387E-05	2,65872269003498E-05	0,735599331971405
26	9	9,99939083679270E-05	2,25550211743604E-05	0,737496148651975
26	10	9,99991050067158E-05	2,81164769800658E-05	0,735351645244325
27	1	9,99991703648059E-05	2,81165445658871E-05	0,73535160468244
27	2	9,99986595224394E-05	3,67601226010089E-05	0,738994780031042
27	3	9,99966477904709E-05	2,84448261235038E-05	0,735335655736814
27	4	9,87424108946462E-05	2,86515010709462E-05	0,736056443607656
27	5	9,99974196206657E-05	2,83090506878195E-05	0,735340917266891
27	6	9,74068462845184E-05	2,61898904411091E-05	0,736987525572141

27	7	9,99824243013683E-05	2,82665143203153E-05	0,735351417380802
27	8	9,99989517047598E-05	2,94046103841980E-05	0,735353503094614
27	9	9,95721054416072E-05	3,34120985372133E-05	0,736930655328779
27	10	9,99923800245106E-05	2,84448261235038E-05	0,735338043873705
28	1	9,99864041567940E-05	2,86742052105618E-05	0,735336604588565
28	2	9,95278431856155E-05	2,84448261235038E-05	0,735599780186301
28	3	9,99998069025280E-05	2,81165445658871E-05	0,735351256668708
28	4	9,99922225098688E-05	2,43679273372098E-05	0,736415870597038
28	5	9,99612446297533E-05	2,86522693664105E-05	0,735351098081971
28	6	9,99991006778480E-05	2,86589816866327E-05	0,73532952536923
28	7	9,99864558372767E-05	2,74233545304051E-05	0,735434903330853
28	8	9,99976669060007E-05	2,86522693664105E-05	0,735330409735355
28	9	9,99985884827045E-05	2,77010520656995E-05	0,735391353469842
28	10	9,99997405465698E-05	2,51416731327921E-05	0,736063790418736
29	1	9,76481298314707E-05	3,45842933461120E-05	0,739305063867982
29	2	9,97844518367846E-05	3,24426480514879E-05	0,736258076857989
29	3	9,99966787962427E-05	3,47095554761633E-05	0,737377832313374
29	4	9,99854376803561E-05	2,86300008672332E-05	0,735337611658897
29	5	9,99974196206657E-05	2,77560751275517E-05	0,735385633719736
29	6	9,99988337189367E-05	2,84448261235038E-05	0,735334432660424
29	7	9,99998153162821E-05	2,84448261235038E-05	0,735333883459959
29	8	9,99864043431333E-05	2,84401960825122E-05	0,735341546041239
29	9	9,99992977801203E-05	2,86589816866327E-05	0,735329413424761
29	10	9,99856813796908E-05	2,86742052105618E-05	0,735337015686283
30	1	9,99859234289793E-05	2,84448261235038E-05	0,735341657392465
30	2	9,99994678736066E-05	2,86301533090327E-05	0,735329655708597
30	3	9,99855773798044E-05	2,95421987960088E-05	0,735372858875453
30	4	9,99974644955154E-05	2,83094183623918E-05	0,735340874163882
30	5	9,99995318612437E-05	2,84448261235038E-05	0,735334042050495
30	6	9,99898417693594E-05	3,03708649222206E-05	0,735483780709423
30	7	9,99977709042246E-05	2,63098971151849E-05	0,735665780057175

30	8	9,99988337189367E-05	2,95987826835154E-05	0,735370111792892
30	9	9,70245203765618E-05	3,28002139963416E-05	0,738601998792737
30	10	9,99879587245489E-05	3,21985500430722E-05	0,736009702791003
31	1	9,53001498502363E-05	2,86301533090327E-05	0,738208163562442
31	2	9,99863030979838E-05	2,86517129965555E-05	0,735336867943434
31	3	9,99966477904709E-05	3,00355785296032E-05	0,735424256842269
31	4	9,87849876033745E-05	3,11542809646528E-05	0,736489259207686
31	5	9,96681815192766E-05	3,25593219082907E-05	0,736395357749884
31	6	9,67107611195295E-05	2,91697399428007E-05	0,737382518392572
31	7	9,99992600340993E-05	2,86515010709462E-05	0,73532951371093
31	8	9,91351923428983E-05	2,83090506878195E-05	0,735824863425167
31	9	9,60013294485436E-05	3,45155853528752E-05	0,740780893173566
31	10	9,76002537906414E-05	2,84448261235038E-05	0,736730356782386
32	1	9,99992936942324E-05	2,84441335476157E-05	0,7353341991075
32	2	9,75321781683900E-05	3,21670836303241E-05	0,737840340400722
32	3	9,99991006778480E-05	2,86549047667116E-05	0,73532956753118
32	4	9,90490483950984E-05	2,86515010709462E-05	0,735876512595105
32	5	9,27554589014590E-05	3,01348356873121E-05	0,740577123648544
32	6	9,99966518763547E-05	2,86596742625208E-05	0,735330909314602
32	7	9,99864041567940E-05	3,15382987480083E-05	0,735777711573422
32	8	9,04181526726339E-05	2,90469408582997E-05	0,74189534615279
32	9	9,99976669060007E-05	2,86235075195669E-05	0,735330767505895
32	10	9,99988367485510E-05	2,86589816866327E-05	0,7353296752692
33	1	9,99989624562393E-05	2,79976917522145E-05	0,735361006569795
33	2	9,34749610210705E-05	2,86235075195669E-05	0,739447162137279
33	3	9,99992977801203E-05	2,86620387373486E-05	0,735329383018828
33	4	9,99966477904709E-05	2,84426879656573E-05	0,73533572917761
33	5	9,99991087249007E-05	2,84444473003865E-05	0,735334291804514
33	6	9,99994678736066E-05	2,57673485694525E-05	0,735831094723657
33	7	9,99992600340993E-05	2,86494777860157E-05	0,735329536124068
33	8	9,50103099094184E-05	2,84417690727878E-05	0,738364438418515

33	9	9,99992871786479E-05	2,86618124203673E-05	0,735329391255893
33	10	9,95226492434688E-05	2,86593605097500E-05	0,735602032841526
34	1	9,99992648578326E-05	2,86515010709462E-05	0,735329510972722
34	2	9,99988441760030E-05	2,62677281097191E-05	0,735676984674178
34	3	9,99992977156485E-05	2,86619988380033E-05	0,735329383445493
34	4	9,99974899948429E-05	2,80479774592917E-05	0,735357683092667
34	5	9,99992870498121E-05	2,86618095289238E-05	0,735329391357412
34	6	9,99989576325060E-05	2,86515010709462E-05	0,73532968537094
34	7	9,99999618042997E-05	3,17065131461320E-05	0,735822956771045
34	8	9,99992600985711E-05	2,89213328206609E-05	0,735330671288102
34	9	9,99992979089561E-05	2,79885775564065E-05	0,735361603002035
34	10	9,99990994084479E-05	2,86620387373486E-05	0,735329495708333
35	1	9,99989557262756E-05	2,86515010709462E-05	0,735329686453028
35	2	9,99992977979981E-05	2,86618095289238E-05	0,735329385251777
35	3	9,84678010740250E-05	2,51757898027435E-05	0,736744314661137
35	4	9,99993723759675E-05	2,95082224762953E-05	0,735361543696854
35	5	9,63065472588307E-05	3,51118754238471E-05	0,741021713656444
35	6	9,99992890848783E-05	2,86618124203673E-05	0,735329390173036
35	7	9,99992870319343E-05	2,10510651170180E-05	0,738670739315414
35	8	9,99990994084479E-05	2,86548644123295E-05	0,735329568678654
35	9	9,99992977801203E-05	2,43759816755997E-05	0,736408936153913
35	10	9,99994681313982E-05	2,86301617056477E-05	0,735329655450095
36	1	9,80123512920705E-05	2,92081309459240E-05	0,736551917139232
36	2	9,99992977979981E-05	2,86619988046526E-05	0,735329383399039
36	3	9,78865418770142E-05	2,75974531480216E-05	0,73655622565035
36	4	9,99998983111319E-05	3,28214573931975E-05	0,736301921105453
36	5	9,99993174276212E-05	2,86618095622745E-05	0,735329374100614
36	6	9,36492521138385E-05	2,86618095289238E-05	0,739335861699363
36	7	9,99997044918289E-05	2,86618173755292E-05	0,735329154148905
36	8	9,99992977801203E-05	2,54730839420192E-05	0,735935169529885
36	9	9,99994800244783E-05	2,86301617056477E-05	0,735329648709057

36	10	9,99990887847680E-05	2,93070518787502E-05	0,735346721534123
37	1	9,99992749993660E-05	2,38941070071674E-05	0,736659874006438
37	2	9,99993174276212E-05	2,02320247184163E-05	0,739417653484625
37	3	9,75977726516871E-05	2,16587605875276E-05	0,739020976971296
37	4	9,99992930645775E-05	2,86301617056477E-05	0,735329754678833
37	5	9,49323599614098E-05	2,82769230475064E-05	0,738387339951303
37	6	9,99992600340993E-05	2,62854472603514E-05	0,735671835794013
37	7	9,99992977801203E-05	2,86620387377911E-05	0,735329383018824
37	8	9,99995462787382E-05	2,86589816866327E-05	0,735329272290599
37	9	9,99992977979981E-05	2,82471449611731E-05	0,735343168529238
37	10	9,99992968759227E-05	2,86619204531432E-05	0,735329384689296
38	1	9,99992977801203E-05	2,75433132441539E-05	0,735411061031613
38	2	9,99990996012265E-05	2,86619985914217E-05	0,735329495990956
38	3	9,99993174519834E-05	2,86618095622745E-05	0,735329374086775
38	4	9,99995462787382E-05	3,17022208898129E-05	0,735821813742627
38	5	9,87776293550321E-05	2,86618200206974E-05	0,73603600077981
38	6	9,99997670692693E-05	1,90355059318762E-05	0,740642698895879
38	7	9,99992968759227E-05	3,44087279319172E-05	0,737177780339697
38	8	9,99992977736359E-05	2,86619988046526E-05	0,735329383412878
38	9	9,99992977801203E-05	2,87052768021750E-05	0,735329066120782
38	10	9,99996173356323E-05	2,63892477557739E-05	0,735643379927513
39	1	9,99990996012265E-05	2,94231063494756E-05	0,735354806113533
39	2	9,99992977979981E-05	3,23839109883635E-05	0,736075689253104
39	3	9,99992977801203E-05	2,63075050600326E-05	0,735665705645208
39	4	9,99995390969669E-05	2,86589816866327E-05	0,735329276369453
39	5	9,99994482922662E-05	2,74057835075131E-05	0,735430788579146
39	6	9,99992977801203E-05	2,73711349116332E-05	0,735436193713846
39	7	9,99993174276212E-05	2,92756349499821E-05	0,735344657552991
39	8	9,99993049618916E-05	2,40827746284487E-05	0,736558504467
39	9	9,37945912191360E-05	2,87061407315735E-05	0,739246560178163
39	10	9,99997673300214E-05	3,10672083823694E-05	0,735632511333405

40	1	9,99993175735453E-05	2,86618095622745E-05	0,73532937401772
40	2	9,99992977801203E-05	3,37319455300374E-05	0,736769862629118
40	3	9,99999938559597E-05	1,89163132357271E-05	0,740773371471275
40	4	9,99993787915662E-05	2,50629642391654E-05	0,736096363432032
40	5	9,99992967543607E-05	2,86619204531432E-05	0,735329384758352
40	6	9,80303055327409E-05	2,87052768021750E-05	0,736487452527638
40	7	9,99997044918289E-05	2,61627416579851E-05	0,735706627683566
40	8	9,87122620001211E-05	2,51354580494677E-05	0,736645333426662
40	9	9,99994879812040E-05	2,89256740555462E-05	0,735330625340594
40	10	9,99995390969669E-05	2,38889704434621E-05	0,736662582962813
41	1	9,96055629760393E-05	2,86589816866327E-05	0,735554332514857
41	2	9,99997992165377E-05	2,86619988380033E-05	0,735329098560313
41	3	9,99992968926113E-05	3,25195657624004E-05	0,73616798149067
41	4	9,99997014536449E-05	2,86618173755292E-05	0,735329155874762
41	5	9,99992977801203E-05	2,85254702230540E-05	0,735331772069772
41	6	9,99998970179090E-05	2,02190232011741E-05	0,739429932083391
41	7	9,99992977634316E-05	3,51658513830816E-05	0,737695069004656
41	8	9,99993174849673E-05	2,86620386795411E-05	0,735329371825646
41	9	9,74797652928065E-05	3,27293049767563E-05	0,738186690411297
41	10	9,99992978686983E-05	2,86618096200820E-05	0,735329385210722
42	1	9,99997992165377E-05	3,26368866191254E-05	0,736218615102263
42	2	9,99997167763457E-05	2,86589816866327E-05	0,735329175457508
42	3	9,99997014536449E-05	2,78380868888128E-05	0,735375595360008
42	4	9,99992978686983E-05	3,46521484507601E-05	0,737337077265041
42	5	9,99992977979981E-05	2,86619988379683E-05	0,735329383398713
42	6	9,99992977801203E-05	2,86619997263710E-05	0,735329383400182
42	7	9,99998013166351E-05	3,21941758259838E-05	0,735999450054922
42	8	9,99992977801203E-05	2,92478751406868E-05	0,735343058344015
42	9	9,99992977156485E-05	2,86619988046877E-05	0,735329383445818
42	10	9,99995471422989E-05	2,86589816866327E-05	0,735329271800143
43	1	9,99992977801203E-05	2,80691518579273E-05	0,735355047892622

43	2	9,99993175735453E-05	2,86617980454688E-05	0,735329374130593
43	3	9,99997240091142E-05	2,86621073031863E-05	0,735329140221034
43	4	9,99995808634742E-05	2,68526589958324E-05	0,735531965496136
43	5	9,99998209797299E-05	2,86619988380033E-05	0,735329086197496
43	6	9,97614071141762E-05	3,09954378237708E-05	0,735773439442592
43	7	9,99993009047603E-05	2,86589131207950E-05	0,735329412344214
43	8	9,99992977801203E-05	2,86619542003409E-05	0,735329383845442
43	9	9,97677017316283E-05	2,87052768021750E-05	0,735461476865508
43	10	9,91306884055290E-05	2,86620387373486E-05	0,7358291709169
44	1	9,99997215146735E-05	2,86619988380033E-05	0,73532914269976
44	2	9,99995390969669E-05	2,74731775485783E-05	0,735420768185388
44	3	9,99995476383016E-05	2,86589816866327E-05	0,735329271518441
44	4	9,51392305292308E-05	3,10035031509443E-05	0,739130116232723
44	5	9,50766618227328E-05	2,76965088507282E-05	0,738224361542275
44	6	9,99998234741707E-05	2,44256169707748E-05	0,736384353238958
44	7	9,99992964205569E-05	2,87052768021750E-05	0,735329066895447
44	8	9,99997014536449E-05	2,43696832977309E-05	0,736411878811866
44	9	9,99993929531631E-05	2,73437964841841E-05	0,73544044322338
44	10	9,99993020792906E-05	2,87056948696342E-05	0,735329061638735
45	1	9,99998220999567E-05	3,19967963421867E-05	0,735924814569923
45	2	9,99998811537065E-05	2,87052768021750E-05	0,735328733723356
45	3	9,99993020792906E-05	2,87052431544352E-05	0,735329063835595
45	4	9,99997290537840E-05	2,86620911145808E-05	0,735329137513709
45	5	9,99998451429804E-05	2,86619988380033E-05	0,73532907247131
45	6	9,99993174849673E-05	2,23613851177839E-05	0,73763145831275
45	7	9,99997109378197E-05	2,86589978752382E-05	0,735329178609393
45	8	9,99992964205569E-05	2,87057017540333E-05	0,735329064829816
45	9	9,99998326195878E-05	2,86619988380033E-05	0,735329079585353
45	10	9,99993020792906E-05	2,87052699177759E-05	0,735329063704793
46	1	9,85461366627511E-05	2,87052768021750E-05	0,736175976683126
46	2	9,99995437782151E-05	2,87052768021750E-05	0,735328925954103

46	3	9,99997167763457E-05	2,92075632730247E-05	0,735340626996802
46	4	9,99999655550664E-05	2,86619988380033E-05	0,735329004070116
46	5	9,99997297001307E-05	2,86619918205089E-05	0,73532913811865
46	6	9,99992964046631E-05	1,87742033155380E-05	0,740931496525519
46	7	9,99996424609274E-05	3,53118031793446E-05	0,737801873781368
46	8	9,99993858494172E-05	2,87056948696342E-05	0,735329013906049
46	9	9,99998449584023E-05	2,86620981320752E-05	0,735329071603678
46	10	9,59997239568187E-05	1,68310094125027E-05	0,744377774950951
47	1	9,99996354255297E-05	2,41599299610563E-05	0,736518072063773
47	2	9,99999612779694E-05	2,86619988380033E-05	0,735329006499756
47	3	9,99997979554382E-05	2,87052784667144E-05	0,735328781119956
47	4	9,99992977801203E-05	2,72035806210321E-05	0,735463867869285
47	5	9,99998727644048E-05	2,82769387109705E-05	0,735341212092685
47	6	9,99992964205569E-05	2,32018594903822E-05	0,737066031962149
47	7	9,99998906719727E-05	3,23785680016339E-05	0,736073064058601
47	8	9,99995447767751E-05	2,87056932050948E-05	0,735328923356744
47	9	9,99030574409520E-05	2,87052768021750E-05	0,735383980394824
47	10	9,99993104685759E-05	2,87056948696342E-05	0,735329056858468
48	1	9,99997979554382E-05	2,76658886160089E-05	0,735394945622793
48	2	9,01256311251103E-05	2,87052431544352E-05	0,741963385901354
48	3	9,99998811537065E-05	2,99866242145926E-05	0,73541525100428
48	4	9,99993104685759E-05	2,06912498582852E-05	0,73898966382576
48	5	9,99999655423895E-05	2,86619988380033E-05	0,735329004077317
48	6	9,99992964205569E-05	2,87057016991465E-05	0,735329064830081
48	7	9,99998449584023E-05	2,87067396071688E-05	0,735328747290123
48	8	9,99999643158768E-05	2,18701532803267E-05	0,737998358648249
48	9	9,99999825301785E-05	3,28496143686791E-05	0,736314915095797
48	10	9,99998811537065E-05	3,05945147103572E-05	0,735521198580787
49	1	9,99998449584023E-05	2,84216202940178E-05	0,735334694489227
49	2	9,99999912352619E-05	2,80374029652793E-05	0,735357166207182
49	3	9,99995725724822E-05	2,86615842476450E-05	0,735329231376432

49	4	9,99998811537065E-05	2,91192396994817E-05	0,735336388916718
49	5	9,99999841667259E-05	2,86619988380033E-05	0,735328993497613
49	6	9,67258957168146E-05	2,87057017540333E-05	0,737297912023265
49	7	9,99999672789757E-05	2,87052784667144E-05	0,73532868464279
49	8	9,99999540389386E-05	2,87061094599925E-05	0,735328688144821
49	9	9,63456477430303E-05	2,87052768021750E-05	0,737540427791906
49	10	9,99999606259136E-05	3,22736801285335E-05	0,736030632721626
50	1	9,92786515612978E-05	2,67040096161704E-05	0,735925238226888
50	2	9,27334431089493E-05	2,79559573884417E-05	0,739792350441302
50	3	9,78681139553220E-05	3,21097170761757E-05	0,737551205602293
50	4	9,99995003310067E-05	2,85525475347112E-05	0,735331016617483
50	5	9,99998891181108E-05	2,87056932050948E-05	0,735328727151299
50	6	9,99997342940815E-05	2,36783224908665E-05	0,736780523531828
50	7	9,99999776608354E-05	2,70726087259571E-05	0,735487363726502
50	8	9,99997965319812E-05	2,35153961316114E-05	0,73687520196946
50	9	9,99995368123707E-05	3,18226677944715E-05	0,735862833049023
50	10	9,99998803970233E-05	2,87052768009356E-05	0,735328734154505
51	1	9,99999379627686E-05	2,87056932050948E-05	0,735328699319809
51	2	9,73214211277707E-05	2,87057091087778E-05	0,736923798070727
51	3	9,99993187001618E-05	2,18987685815370E-05	0,737976457315551
51	4	9,57039192728805E-05	3,13880721620073E-05	0,738879196163502
51	5	9,99999664369338E-05	2,59698692737204E-05	0,73576496227382
51	6	9,99995447767751E-05	2,87052608984919E-05	0,735328925462996
51	7	8,79807766698298E-05	3,14041744867438E-05	0,745828245030047
51	8	9,99999075908592E-05	2,76266476255605E-05	0,735399778006778
51	9	9,99999913102314E-05	2,87052768021750E-05	0,735328670958477
51	10	9,74104592683818E-05	2,87052786055575E-05	0,736868418594219
52	1	9,90651154663261E-05	2,87067396071688E-05	0,735868786445666
52	2	9,99995447767751E-05	2,87052643173682E-05	0,735328925446257
52	3	9,88658749774270E-05	2,87056926545802E-05	0,735985794960954
52	4	9,99999672789757E-05	3,04148003376909E-05	0,735485474145975

52	5	9,91290053714832E-05	2,84419596915289E-05	0,735827366219709
52	6	9,99995447767751E-05	2,95863668587344E-05	0,735368496076435
52	7	9,99999540916500E-05	2,87061100105071E-05	0,735328688112133
52	8	9,99993104685759E-05	2,91698060412760E-05	0,735338987670286
52	9	9,99995447767751E-05	2,87052770024581E-05	0,735328925384157
52	10	9,99999913102314E-05	3,03590566034425E-05	0,735475136596311
53	1	9,99998451805561E-05	2,87052768009356E-05	0,735328754220153
53	2	9,99999134021238E-05	2,87052643173682E-05	0,735328715410165
53	3	9,99999540915213E-05	2,82430554965798E-05	0,735343039239462
53	4	9,99995447767751E-05	2,81720555050516E-05	0,735347607714363
53	5	9,63583209168297E-05	2,87052784667144E-05	0,737532296281672
53	6	9,07852753341427E-05	2,82574941693336E-05	0,74127222449548
53	7	9,99999924541579E-05	2,87052768021750E-05	0,735328670306692
53	8	9,99999540390673E-05	2,87061100146591E-05	0,735328688142076
53	9	9,99999124055920E-05	2,87052768021750E-05	0,735328715916666
53	10	9,99999362598317E-05	2,81719667143696E-05	0,735347398631108
54	1	9,99999929885730E-05	2,87052768021750E-05	0,735328670002194
54	2	9,07608231533465E-05	2,29559839542867E-05	0,741247290975336
54	3	9,99999924541579E-05	2,16013101169670E-05	0,738210704223899
54	4	9,87043813786054E-05	2,70995939843590E-05	0,736154045720069
54	5	9,99999333353069E-05	2,87052643173682E-05	0,73532870405266
54	6	9,51918439341667E-05	2,87052768021750E-05	0,738294686553545
54	7	9,99999540390673E-05	2,90439721870944E-05	0,735333513463857
54	8	9,93573163833527E-05	2,87056932050948E-05	0,735698343323694
54	9	9,99999795014202E-05	2,87061094599925E-05	0,735328673636001
54	10	9,99999382027136E-05	2,48952475759879E-05	0,736167517231464
55	1	9,99999168813464E-05	2,58386315404055E-05	0,735807163396811
55	2	9,89319712175098E-05	3,01744500769333E-05	0,73612777615836
55	3	9,99999924577069E-05	2,62407012797569E-05	0,735684052927543
55	4	9,99999582770722E-05	3,25646429287025E-05	0,736186906860207
55	5	9,99999672789757E-05	2,87052829713664E-05	0,735328684620667

55	6	9,99999134021238E-05	3,05592858114265E-05	0,735513898044674
55	7	9,99999913066825E-05	2,87052768021750E-05	0,735328670960499
55	8	9,99999927237600E-05	2,60979152513828E-05	0,735725670936694
55	9	9,99999540910612E-05	2,37339490772739E-05	0,736748785390286
55	10	9,99999554499210E-05	2,87061099977678E-05	0,735328687338236
56	1	9,84954408527120E-05	2,87052643173682E-05	0,736206367306141
56	2	9,99999966417885E-05	1,42297129547041E-05	0,747149844623975
56	3	9,99999985702308E-05	2,87061051864704E-05	0,735328662790972
56	4	9,99998886623348E-05	3,29317385326082E-05	0,736353580007195
56	5	9,92341734536422E-05	3,36629388178770E-05	0,73730694358986
56	6	9,55376835063733E-05	2,87056932050948E-05	0,738065760350781
56	7	9,99999913426841E-05	2,87052768021750E-05	0,735328670939986
56	8	9,99999540916500E-05	3,03795985232797E-05	0,735478923319782
56	9	9,99999677347518E-05	2,87056946516859E-05	0,735328682348834
56	10	9,76170972780387E-05	3,28065632730161E-05	0,738119718208716
57	1	9,99999947006909E-05	2,87052768021750E-05	0,735328669026667
57	2	9,99999124055920E-05	2,77708358341725E-05	0,735382661025197
57	3	9,99999542214572E-05	2,79897286924285E-05	0,735361148554588
57	4	9,99999911078800E-05	2,87052768021750E-05	0,735328671073772
57	5	9,99999795014202E-05	2,26518410880389E-05	0,737426851951564
57	6	9,99999969096740E-05	2,87056946516859E-05	0,735328665725113
57	7	9,99999985702308E-05	2,87052811624273E-05	0,735328666800468
57	8	9,94240141243342E-05	2,68701815182307E-05	0,735818621257708
57	9	9,82015470673296E-05	2,98089227993498E-05	0,736530791991256
57	10	9,22359758761003E-05	2,86991938519822E-05	0,7403581773804
58	1	9,99999974792278E-05	2,87052811980541E-05	0,735328667421923
58	2	9,76588025249355E-05	2,87052768181427E-05	0,736714896618021
58	3	9,99999946077579E-05	3,17388042593328E-05	0,735833783483463
58	4	9,82556056272528E-05	2,87061051864704E-05	0,736350850072371
58	5	9,99999540390673E-05	2,87608514680844E-05	0,735328593855195
58	6	9,95109523162986E-05	2,87052767665482E-05	0,735609326535879

58	7	9,99999678348534E-05	2,87052784507467E-05	0,735328684326141
58	8	9,37980487703465E-05	2,87052768021750E-05	0,739243917927473
58	9	9,99999961004019E-05	3,17267448712064E-05	0,7358297167873
58	10	9,99999526726348E-05	3,06299825298814E-05	0,735528622734954
59	1	9,99999975857331E-05	2,87056946516859E-05	0,735328665339898
59	2	9,99999990902119E-05	3,01157787334329E-05	0,735434193501152
59	3	9,74425164099461E-05	2,87061095904060E-05	0,73684861854039
59	4	9,99999540390673E-05	4,03580909565619E-05	0,742963471348096
59	5	9,99999965918275E-05	2,16867546450987E-05	0,738142335558096
59	6	9,99999999721087E-05	2,87052811624273E-05	0,735328666001709
59	7	9,49796010387981E-05	2,87056902477503E-05	0,738436578885477
59	8	9,94674278647104E-05	2,87602522669600E-05	0,735635579698752
59	9	9,81165602739407E-05	2,78255503974117E-05	0,736416595227322
59	10	9,84795831866072E-05	2,36512290579893E-05	0,737412416662882
60	1	9,44220769928573E-05	2,53010633007338E-05	0,738727343483173
60	2	9,99999969263315E-05	2,87060927943036E-05	0,735328663787411
60	3	9,40868404905981E-05	2,90530777612082E-05	0,739140469832593
60	4	9,99999990724646E-05	2,87056946516859E-05	0,735328664492766
60	5	9,99999970471829E-05	2,96723323597905E-05	0,735376780355639
60	6	9,99999998846824E-05	2,87057070438527E-05	0,735328663969681
60	7	9,84313194060345E-05	2,77177624406188E-05	0,736243204453943
60	8	9,43816734276142E-05	3,16224946632683E-05	0,740082411171515
60	9	9,99999985427534E-05	2,35170168196776E-05	0,736874165926512
60	10	9,99999657655746E-05	2,71249800079366E-05	0,735477602709453
61	1	9,99999971463770E-05	2,87052768021750E-05	0,735328667633169
61	2	9,99999985481509E-05	2,87052768021750E-05	0,735328666834469
61	3	9,99999998861261E-05	2,87057070438527E-05	0,735328663968859
61	4	9,99999990603343E-05	2,87100521584021E-05	0,735328644371128
61	5	9,99999976995722E-05	2,87056946516859E-05	0,735328665275033
61	6	9,99999998167652E-05	2,87052811624273E-05	0,73532866609022
61	7	9,99999924762377E-05	3,48555688116566E-05	0,737474705132678

61	8	9,99999990710200E-05	2,51012112551317E-05	0,736080252468924
61	9	9,99999534154497E-05	2,93417860305893E-05	0,735348468529526
61	10	9,99999924736948E-05	2,81743364961940E-05	0,735347213572733
62	1	9,99999985481509E-05	2,89131204608202E-05	0,73533008770315
62	2	9,99999767375931E-05	2,60855717288197E-05	0,735729384362823
62	3	9,99999970403784E-05	3,17918050618764E-05	0,735851844761548
62	4	9,83009970534910E-05	2,87288412037422E-05	0,736324934996165
62	5	9,99999990445945E-05	2,87057069869897E-05	0,735328664448636
62	6	9,48758944847392E-05	2,48461280720364E-05	0,738594436275683
62	7	9,99999972645471E-05	2,87612957558418E-05	0,735328569750479
62	8	9,99999998861261E-05	2,93644944589039E-05	0,735349992534078
62	9	9,99999999125370E-05	2,87056947085488E-05	0,735328664013821
62	10	9,78730225997343E-05	2,87612757655129E-05	0,736588249516915
63	1	9,99999999125370E-05	2,33769411901238E-05	0,736957945780789
63	2	9,80048674890018E-05	2,87612957558418E-05	0,736507454302749
63	3	9,95496786601275E-05	4,53266493868856E-05	0,751457036691091
63	4	9,99999969263315E-05	3,08816438771233E-05	0,735585681772691
63	5	9,99999986035310E-05	3,00895551872094E-05	0,735430180291376
63	6	9,99999540390673E-05	3,00876940988517E-05	0,735429926339899
63	7	9,99999976995722E-05	2,87057076721136E-05	0,735328665211691
63	8	9,99999978401591E-05	2,87060927943036E-05	0,735328663266703
63	9	9,99999985734867E-05	2,87061051864704E-05	0,735328662789116
63	10	9,99999990692087E-05	2,87056946516859E-05	0,735328664494621
64	1	9,58593529048056E-05	2,88765250266079E-05	0,737886224284753
64	2	9,99999537764258E-05	2,87063781806954E-05	0,735328687004084
64	3	9,99999999987122E-05	2,87606898161287E-05	0,73532856734656
64	4	9,98962310813950E-05	3,38748664982941E-05	0,736934695859916
64	5	9,99999999163889E-05	3,27430861671808E-05	0,736265971991371
64	6	9,55717623278214E-05	2,81558986076176E-05	0,737959960390699
64	7	9,99999999898088E-05	2,82484008807488E-05	0,735342709946054
64	8	9,99999996276087E-05	2,87067111261836E-05	0,735328659289068

64	9	9,99999969608612E-05	2,85669102039697E-05	0,735330429752922
64	10	9,99999985577136E-05	2,87056941310070E-05	0,735328664788602
65	1	9,99999994983142E-05	2,87060981320104E-05	0,735328662296139
65	2	9,99999999748922E-05	2,87057070438527E-05	0,735328663918281
65	3	9,96617149855814E-05	3,34977576907543E-05	0,736907033298662
65	4	9,99999541275844E-05	3,06362738418674E-05	0,735529961760768
65	5	9,99999998850055E-05	2,87056880529340E-05	0,735328664061894
65	6	9,99999990577769E-05	2,85104819889615E-05	0,735331768505441
65	7	9,99999971889145E-05	2,87612957558418E-05	0,735328569793741
65	8	9,78831773136006E-05	2,84214297764407E-05	0,736558553984231
65	9	9,85152590962075E-05	2,95180141084539E-05	0,736278160883409
65	10	9,99999996276087E-05	2,87061027120809E-05	0,735328662200391
66	1	9,99999995851840E-05	2,87606886215837E-05	0,735328567581478
66	2	9,99999996276087E-05	2,76119289594970E-05	0,735401608662598
66	3	9,99999969809302E-05	2,87061028193566E-05	0,73532866370798
66	4	9,73189063253166E-05	3,28346649009509E-05	0,738379935780127
66	5	9,99999999987122E-05	2,87488411646009E-05	0,735328559264001
66	6	9,99999999585848E-05	2,87067044059813E-05	0,735328659132395
66	7	9,99999999748922E-05	3,10655743169640E-05	0,735631927530712
66	8	9,58739883721269E-05	2,88104211196450E-05	0,737864116915153
66	9	9,88382528326179E-05	3,02353247216932E-05	0,736201999672189
66	10	9,99999999760738E-05	3,38544448735345E-05	0,736839316773037
67	1	9,99999982239968E-05	3,64886324117912E-05	0,738752224559545
67	2	9,99999999214218E-05	2,87060981320104E-05	0,735328662055048
67	3	9,99999540390673E-05	2,87613021177106E-05	0,735328594484987
67	4	9,99999999857366E-05	2,87606898161287E-05	0,735328567353982
67	5	9,99999998243753E-05	3,47770138755910E-05	0,737420774537092
67	6	9,99999999922506E-05	2,89580927128637E-05	0,735331037015529
67	7	9,99999978421276E-05	2,29517268630414E-05	0,737225765313495
67	8	9,99999971889145E-05	2,91521493296162E-05	0,735337760612266
67	9	9,99999990655995E-05	2,87100521584021E-05	0,735328644368127

67	10	9,75766045157442E-05	3,16253935630549E-05	0,737549415824023
68	1	9,99999990603343E-05	2,68083687436494E-05	0,735541358903162
68	2	9,99999999987122E-05	2,87491124091866E-05	0,735328559271514
68	3	9,99999998739248E-05	2,87612957558418E-05	0,735328568257887
68	4	9,99999996618255E-05	2,87606931630917E-05	0,735328567543781
68	5	9,99999999880133E-05	2,87052023730154E-05	0,735328666380042
68	6	9,99999991730159E-05	2,87100521584021E-05	0,735328644306903
68	7	9,99999999585848E-05	2,87064331613955E-05	0,735328660425367
68	8	9,99999978632551E-05	3,02341067170810E-05	0,735453270834675
68	9	9,99999756535017E-05	2,87608481211215E-05	0,735328581487287
68	10	9,99999985734867E-05	2,46044539820453E-05	0,736298797533365
69	1	9,99999999917490E-05	2,87608489570644E-05	0,735328567567123
69	2	9,99999993770292E-05	2,87606704511170E-05	0,735328567675995
69	3	9,99999998821522E-05	2,95598103351708E-05	0,735365745512351
69	4	9,77100711248210E-05	2,62887943450061E-05	0,736811087488996
69	5	9,99621759712792E-05	3,48912197832717E-05	0,737531808599315
69	6	9,99999979088673E-05	2,55759266441469E-05	0,735897394369284
69	7	9,99999542273684E-05	2,88528935119528E-05	0,735329198926694
69	8	9,94195123071708E-05	3,29485685866964E-05	0,736768736996144
69	9	9,99999992400147E-05	2,47273297612667E-05	0,736242151212226
69	10	9,99999973518311E-05	2,76744129514557E-05	0,735393800654995
70	1	9,99999996618255E-05	2,87606898062587E-05	0,735328567539242
70	2	9,71378142744063E-05	2,87491124091866E-05	0,737043490501186
70	3	9,99999786581320E-05	2,87608514680844E-05	0,735328579773248
70	4	9,99999999920726E-05	2,87608489570644E-05	0,735328567566938
70	5	9,99999999942517E-05	1,82917763101751E-05	0,741484062103388
70	6	9,99999999857366E-05	2,61971583006256E-05	0,735696496992648
70	7	9,94125388021216E-05	2,87606898161287E-05	0,735667507388843
70	8	9,99999999599963E-05	2,91325502174465E-05	0,735336886810012
70	9	9,73564653021852E-05	2,87100521584021E-05	0,73690245865127
70	10	9,99999993766383E-05	2,87488411646009E-05	0,735328559619525

71	1	9,99999995909926E-05	3,08839036358169E-05	0,735586225026726
71	2	9,99999999903898E-05	2,87612957558418E-05	0,735328568191267
71	3	9,99999997463648E-05	2,74171742018442E-05	0,735428780013579
71	4	9,99999999379470E-05	2,87608713826712E-05	0,735328567628648
71	5	9,99999999892997E-05	3,22075591414653E-05	0,736004525258217
71	6	9,99999999852443E-05	3,06887560162277E-05	0,735541284096451
71	7	9,99999971561319E-05	2,87488411646009E-05	0,735328560888575
71	8	9,99999999987122E-05	2,63114139285789E-05	0,735664290694807
71	9	9,99999996881002E-05	2,87486402330467E-05	0,735328559441315
71	10	9,99999999990773E-05	3,03573294873135E-05	0,735474816843909
72	1	9,99999999978846E-05	2,87611190028964E-05	0,735328567937679
72	2	9,90142797629232E-05	2,75040682850037E-05	0,735939616735974
72	3	9,99999998856916E-05	2,87491966232650E-05	0,735328559340133
72	4	9,99999996659623E-05	2,07943701604340E-05	0,738896562350075
72	5	9,99999971561319E-05	3,21449996237032E-05	0,735980306880738
72	6	9,99999999987122E-05	2,87488423633546E-05	0,735328559264016
72	7	9,99999993766383E-05	2,87486366594009E-05	0,735328559619355
72	8	9,99999999987122E-05	2,87603149924529E-05	0,735328566847765
72	9	8,91626094159855E-05	2,82517592941350E-05	0,742512532995107
72	10	9,99999999920726E-05	2,94276366570946E-05	0,735354613414155
73	1	9,78831903928847E-05	2,87607136879472E-05	0,736581956652395
73	2	9,74881949917751E-05	2,87606898062587E-05	0,736825928650569
73	3	9,99999993885923E-05	3,46947419543247E-05	0,737365041198312
73	4	9,99999971382277E-05	3,02428604285309E-05	0,73545474540083
73	5	9,99999998162144E-05	2,87486197081912E-05	0,735328559368333
73	6	9,99999998771813E-05	2,87491966232650E-05	0,735328559344997
73	7	9,99999999989412E-05	2,96108074011632E-05	0,735370568521665
73	8	9,33327300583791E-05	2,76829395940311E-05	0,739337692226814
73	9	9,99999999848815E-05	2,87491160776039E-05	0,735328559279577
73	10	9,99999971561319E-05	2,87487864365707E-05	0,735328560888061
74	1	9,99999999699751E-05	2,87492011978601E-05	0,735328559292204

74	2	9,60593466247799E-05	2,87488289293786E-05	0,737732223047641
74	3	9,99999999920298E-05	2,87491160776039E-05	0,735328559275492
74	4	9,97059130875295E-05	2,87486366594009E-05	0,735497359860648
74	5	9,99999971561319E-05	2,87488402195898E-05	0,735328560888563
74	6	9,99999983521178E-05	2,87487818619756E-05	0,735328560204514
74	7	9,99999999996423E-05	3,03314037963111E-05	0,735470140832493
74	8	9,99999999996237E-05	2,87488411646009E-05	0,73532855926348
74	9	9,99999998162144E-05	2,86649873730409E-05	0,735328955807879
74	10	9,87454375845748E-05	2,81595831649319E-05	0,736049043522043
75	1	9,99999999987122E-05	2,52790285820282E-05	0,736008781216661
75	2	9,99999983480192E-05	2,87491160776039E-05	0,735328560215084
75	3	9,99999999922253E-05	2,81273860404028E-05	0,735350382896107
75	4	9,99999998771813E-05	2,87491107293934E-05	0,7353285593409
75	5	9,75151142431828E-05	3,39301987286279E-05	0,738932778087618
75	6	9,99999999856043E-05	2,87487818619756E-05	0,735328559270958
75	7	9,86321335676080E-05	3,40343800750073E-05	0,73804077244351
75	8	9,74643915752423E-05	2,87488423633546E-05	0,736839467521191
75	9	9,99999999992021E-05	2,67245820669511E-05	0,735560129996258
75	10	9,99999999999066E-05	2,81002974503991E-05	0,735352327213986
76	1	9,87534724692687E-05	3,20155238943317E-05	0,736837630064861
76	2	9,99999998162144E-05	3,01657755509274E-05	0,735442060381842
76	3	9,99999999999814E-05	2,87488411646009E-05	0,735328559263276
76	4	9,99999999987122E-05	3,15835947118202E-05	0,735782706521532
76	5	9,99999971487278E-05	2,87488400977837E-05	0,735328560892793
76	6	9,81779244970501E-05	2,24096348445519E-05	0,73827546051095
76	7	9,99999998856916E-05	3,05496203918562E-05	0,735511869377281
76	8	9,99999999987122E-05	2,92522619807715E-05	0,735342891484628
76	9	9,99999999747484E-05	2,87491161994101E-05	0,735328559285374
76	10	9,96201407074459E-05	2,83691688483303E-05	0,735549282580968
77	1	8,41239001535010E-05	2,92356086901947E-05	0,752137597959249
77	2	9,99999999743145E-05	3,05657534335888E-05	0,735515167933874

77	3	9,99999999998366E-05	2,87491966232650E-05	0,735328559274896
77	4	9,99999999987122E-05	3,43247164981138E-05	0,737123764974839
77	5	9,99999998433718E-05	2,87486402330467E-05	0,735328559352577
77	6	9,99999999999430E-05	2,72629842198617E-05	0,735453332080641
77	7	9,99999998736713E-05	2,87488411646009E-05	0,735328559335464
77	8	9,66747478595115E-05	2,72064520529912E-05	0,737262992200477
77	9	9,99999999925841E-05	2,34642657513824E-05	0,736905457486569
77	10	9,99999999841781E-05	2,87491107293934E-05	0,735328559279748
78	1	9,76924469406580E-05	2,87491160776039E-05	0,736698276665011
78	2	9,99999999987122E-05	3,07648223268901E-05	0,735558289894919
78	3	9,99999999999780E-05	2,86915604611298E-05	0,735328744029157
78	4	9,99999999698298E-05	2,63658747307311E-05	0,735649458023257
78	5	9,99999998793814E-05	2,83559926374221E-05	0,735337278448137
78	6	9,99999999999814E-05	2,82385881270683E-05	0,735343270439025
78	7	9,99999999699751E-05	2,44613298672719E-05	0,736366921082969
78	8	9,99999999996841E-05	2,87487801956345E-05	0,735328559262902
78	9	9,99999999999903E-05	2,77445173998842E-05	0,735385562931538
78	10	9,99999999855368E-05	2,95983547054183E-05	0,735369363680028
79	1	9,99999999988287E-05	3,04255992047066E-05	0,735487493407077
79	2	9,73836246144361E-05	2,70480622674202E-05	0,736875975027672
79	3	9,99999999958566E-05	2,41556670075251E-05	0,736520131152148
79	4	9,99999999920298E-05	1,22685261675749E-05	0,75052451236962
79	5	9,99999999989286E-05	2,87488423633546E-05	0,735328559263892
79	6	9,99999999833727E-05	2,80029993415892E-05	0,735359995002018
79	7	9,99999999990642E-05	2,94656387247705E-05	0,73535761177512
79	8	9,99999999841900E-05	2,87488398759681E-05	0,735328559272285
79	9	9,88659092036972E-05	2,58868772086840E-05	0,736328658738533
79	10	9,99999999929284E-05	2,87492011978601E-05	0,735328559279086
80	1	9,99999999987122E-05	2,87488336735565E-05	0,735328559263911
80	2	9,59956944575751E-05	1,79289751800058E-05	0,743052687026212
80	3	9,93623057584640E-05	2,87488407299033E-05	0,735696450090648

80	4	9,99999999989286E-05	2,81372511183794E-05	0,735349695418043
80	5	9,99999999951827E-05	2,87491124091866E-05	0,735328559273531
80	6	9,99999999929284E-05	3,00058944069530E-05	0,735417894594163
80	7	9,92175241658913E-05	2,87488411646009E-05	0,735780943890914
80	8	9,99999999996841E-05	2,87487806303320E-05	0,735328559262904
80	9	9,99999999986713E-05	2,48660694363964E-05	0,736180235722038
80	10	9,99999999989286E-05	2,56097254391988E-05	0,735885343339904
81	1	9,99999999857706E-05	2,87488403264303E-05	0,735328559271387
81	2	9,99999999951827E-05	2,87491089715678E-05	0,735328559273384
81	3	9,99999999996313E-05	2,87488336735565E-05	0,735328559263386
81	4	9,99999999999955E-05	2,87488420530836E-05	0,735328559263279
81	5	9,99999999986355E-05	2,98883978601048E-05	0,735401976875647
81	6	9,99999999989286E-05	2,87488458009735E-05	0,735328559263936
81	7	9,99999999996841E-05	2,62199094979488E-05	0,735689966382734
81	8	9,99999999996841E-05	2,87487797418493E-05	0,735328559262899
81	9	9,99999999987122E-05	2,77247073955346E-05	0,735387834031335
81	10	9,64371972155208E-05	3,06621392636683E-05	0,737998962838941
82	1	9,91739400443435E-05	2,87488411558012E-05	0,735806450280984
82	2	9,67930306034803E-05	2,87487767998554E-05	0,737261098229313
82	3	9,99999999987122E-05	2,83204681792508E-05	0,735338927049749
82	4	9,74730557708057E-05	2,86683836496188E-05	0,736825996698758
82	5	9,94395432523695E-05	2,87487797752492E-05	0,735651520936947
82	6	9,99999999989286E-05	2,76770689367786E-05	0,735393477086069
82	7	9,99999999996841E-05	2,84676607866625E-05	0,735333025044875
82	8	9,98472638951543E-05	2,87488411646009E-05	0,735416046130573
82	9	9,99999999999955E-05	2,87488420196837E-05	0,735328559263278
82	10	9,99999999999955E-05	2,87488413305561E-05	0,73532855926327
83	1	9,99999999856717E-05	2,87488426712152E-05	0,735328559271473
83	2	9,99999999987122E-05	2,87488423670989E-05	0,735328559264016
83	3	9,99999999999503E-05	2,65591096285766E-05	0,73559953171018
83	4	9,92510982553835E-05	2,87488411646009E-05	0,73576131800398

83	5	9,99999999986447E-05	2,87487815541151E-05	0,735328559263503
83	6	9,99999999989286E-05	2,87488336698123E-05	0,735328559263788
83	7	9,99999999996841E-05	2,94113287517716E-05	0,735353376775744
83	8	9,99999999996313E-05	3,10136153567850E-05	0,735618475693886
83	9	9,99999999998273E-05	2,91752813795614E-05	0,735338844225505
83	10	9,99999999996841E-05	2,87487798838934E-05	0,7353285592629
84	1	9,77409207818143E-05	2,39189862880042E-05	0,737592378260441
84	2	9,69539514703145E-05	3,04891622366870E-05	0,737563565780921
84	3	9,99999999996841E-05	2,87488424259110E-05	0,735328559263461
84	4	9,20183054371789E-05	2,87488427016459E-05	0,740536341936705
84	5	9,99999999987122E-05	1,94832563476789E-05	0,740165561850403
84	6	9,99999999996841E-05	3,07485631870222E-05	0,735554599991575
84	7	9,99999999999955E-05	2,87487793356220E-05	0,735328559262719
84	8	9,47315711700290E-05	2,87488330249942E-05	0,738613354893651
84	9	9,99999999998819E-05	3,39086846190605E-05	0,736870856033706
84	10	9,99999999996841E-05	3,27523289969850E-05	0,736270166631565
85	1	9,99999999996841E-05	2,84375379311395E-05	0,735334033544923
85	2	9,59682258306803E-05	2,31907467489854E-05	0,738720116249691
85	3	9,59100853956047E-05	2,49873050814343E-05	0,738036192083718
85	4	9,95422013787473E-05	3,52178686349391E-05	0,738135136111559
85	5	9,99999999987122E-05	2,87488325348926E-05	0,735328559263899
85	6	9,98334892707348E-05	3,55779415205220E-05	0,738152072041612
85	7	9,99999999998496E-05	2,57680121818605E-05	0,735830625267452
85	8	9,99999999999982E-05	2,66980332790569E-05	0,735566243418074
85	9	9,99999999999995E-05	2,87487806654862E-05	0,735328559262724
85	10	9,46706795171318E-05	2,12417272668010E-05	0,740434470302608
86	1	9,99999999999955E-05	3,87082066798296E-05	0,740965208617679
86	2	9,99999999996841E-05	2,87487797189565E-05	0,735328559262899
86	3	9,99999999999888E-05	2,87487799052679E-05	0,735328559262726
86	4	9,99999999999955E-05	2,40418827062103E-05	0,736579849442547
86	5	9,99999999989286E-05	2,64173639810933E-05	0,735635742616609

86	6	9,99999999999968E-05	2,57200498897618E-05	0,735846906855419
86	7	9,99999999999995E-05	2,87487806883790E-05	0,735328559262724
86	8	9,89487491059738E-05	3,02356694060815E-05	0,736129750778294
86	9	9,99999999999966E-05	3,55887397689321E-05	0,738011338656821
86	10	9,99999999999955E-05	1,94369772136539E-05	0,740213842337333
87	1	9,99999999999995E-05	2,75927866061978E-05	0,7354040891679
87	2	9,80642918916660E-05	3,16492191649519E-05	0,73719483692399
87	3	9,99999999999960E-05	2,97250920873142E-05	0,735382444650163
87	4	9,99999999999845E-05	2,99764089579227E-05	0,735413753436679
87	5	9,99999999997631E-05	2,59856573982953E-05	0,735760003394116
87	6	9,99999999996841E-05	3,73376313533327E-05	0,739534040864602
87	7	9,99999999996841E-05	2,61260682852949E-05	0,735717279513402
87	8	9,85864645701966E-05	2,87487806883790E-05	0,736154238344829
87	9	9,37374258264717E-05	2,87487799664924E-05	0,739298199391391
87	10	9,99999999999964E-05	4,11692373546490E-05	0,744055447721514
88	1	9,95769321463934E-05	2,72013306057647E-05	0,735681991270206
88	2	9,99999999999973E-05	2,92894778787499E-05	0,735345088339453
88	3	9,92035039232635E-05	2,87487784220720E-05	0,735789143236603
88	4	9,99999999999477E-05	2,70200660385334E-05	0,735497462882187
88	5	9,91911497851365E-05	3,11297829361397E-05	0,736199634314399
88	6	9,99999999999955E-05	2,87487793103643E-05	0,735328559262719
88	7	9,99999999999965E-05	2,80687950682997E-05	0,735354692669668
88	8	9,99999999999955E-05	3,25469105301248E-05	0,736179212117864
88	9	9,99999999998386E-05	2,87487801956345E-05	0,735328559262814
88	10	9,53212353454888E-05	2,87487806654862E-05	0,738217402820058
89	1	9,66741444060151E-05	2,87488421234496E-05	0,737336705959
89	2	9,94056890306438E-05	2,87487806654862E-05	0,735671200704628
89	3	9,99999999999814E-05	2,87487783767733E-05	0,735328559262722
89	4	9,81656389992615E-05	2,85435019292619E-05	0,736395389975127
89	5	9,99999999997870E-05	3,28069260861969E-05	0,73629514100953
89	6	9,99999999999995E-05	2,81781192314784E-05	0,735346964608002

89	7	9,99999999998973E-05	2,73272102334708E-05	0,735442778680187
89	8	9,80024221024493E-05	2,87487793103643E-05	0,736507908486986
89	9	9,99999999986447E-05	2,87487814863822E-05	0,735328559263503
89	10	9,99999999999324E-05	2,87487802633674E-05	0,73532855926276
90	1	9,99999999999913E-05	2,87487799012231E-05	0,735328559262725
90	2	9,99999999999324E-05	2,92076965425820E-05	0,735340466797395
90	3	9,99999999999992E-05	3,06377346715309E-05	0,735530243691056
90	4	9,99999999999995E-05	2,87487806695310E-05	0,735328559262724
90	5	9,99999999998386E-05	2,86335078232717E-05	0,735329309765298
90	6	9,97972437165342E-05	2,74755900526661E-05	0,735526424660338
90	7	9,43201640157774E-05	2,50633168160535E-05	0,738829304419448
90	8	9,99999999998386E-05	2,87487793355337E-05	0,735328559262809
90	9	9,84532685170244E-05	2,87487806654862E-05	0,736234332362385
90	10	9,99999999999955E-05	2,87487801957228E-05	0,735328559262724
91	1	9,99999999999913E-05	3,17027456744982E-05	0,735821671894468
91	2	9,99999999998768E-05	2,84897561316068E-05	0,735332350522352
91	3	9,99999999999955E-05	2,87487783395693E-05	0,735328559262714
91	4	9,99999999999995E-05	3,29151214323162E-05	0,736345625292177
91	5	9,99999999996841E-05	2,05988030464429E-05	0,739073715919205
91	6	9,99999999999814E-05	2,87487793728260E-05	0,735328559262727
91	7	9,99999999999995E-05	2,87487806886059E-05	0,735328559262724
91	8	9,99999999999981E-05	2,87487793436300E-05	0,735328559262718
91	9	9,99999999999998E-05	4,60824607967081E-05	0,752192907969392
91	10	9,99114049543238E-05	3,44778557048922E-05	0,737295807956244
92	1	9,99999999998912E-05	2,69911350676442E-05	0,735503163060736
92	2	9,99999999999960E-05	2,24031823279903E-05	0,737601220678682
92	3	9,99999999998386E-05	2,60583755690791E-05	0,735737599091017
92	4	9,99999999999888E-05	2,87487799264596E-05	0,735328559262726
92	5	9,99999999999955E-05	3,06759167507841E-05	0,735538478138221
92	6	9,99999999999955E-05	2,87517616844755E-05	0,735328559781534
92	7	9,99999999999814E-05	3,06418012178610E-05	0,735531112857322

92	8	9,99999999999997E-05	2,61278283505113E-05	0,735716758086829
92	9	9,99999999999985E-05	3,15826850856163E-05	0,735782415211634
92	10	9,99999999999969E-05	2,87487801832081E-05	0,735328559262723
93	1	9,99999999999913E-05	2,81037833806216E-05	0,735352072355775
93	2	9,99999999999888E-05	2,99710380428587E-05	0,735413009684893
93	3	9,99999999999998E-05	3,14983728751212E-05	0,735755819547145
93	4	9,99999999999981E-05	2,88542516156861E-05	0,735329188674003
93	5	9,99999999999991E-05	2,76053029637937E-05	0,735402462457551
93	6	9,99999999999955E-05	2,82301641184389E-05	0,735343760297068
93	7	9,99999999999324E-05	2,87487793377159E-05	0,735328559262755
93	8	9,99514938836464E-05	2,59497649448287E-05	0,735794014372369
93	9	9,99999999999981E-05	2,72926608644094E-05	0,735448397784298
93	10	9,55367967846892E-05	2,87487801832081E-05	0,738074521046036
94	1	9,79636057243466E-05	2,45103755956120E-05	0,737230680588815
94	2	9,99999999999995E-05	2,84875733578105E-05	0,735332414700633
94	3	9,99999999999969E-05	2,24767033755319E-05	0,737548941369767
94	4	9,99999999999888E-05	2,87487806525230E-05	0,73532855926273
94	5	9,99999999999955E-05	2,87487783200329E-05	0,735328559262714
94	6	9,99999999999814E-05	2,87487799293843E-05	0,73532855926273
94	7	9,30408910401403E-05	3,24346672665671E-05	0,741825959901304
94	8	9,88739934572787E-05	2,77388130058042E-05	0,735995529936449
94	9	9,99999999999888E-05	2,87487783738486E-05	0,735328559262718
94	10	9,93601754117148E-05	3,05605363425732E-05	0,735932246443354
95	1	9,99999999999955E-05	2,40264917441875E-05	0,736588039021899
95	2	9,99999999999973E-05	1,47770624005631E-05	0,74628176144805
95	3	9,99999999999955E-05	2,80716948174578E-05	0,735354470244846
95	4	9,99999999999991E-05	1,72617713978507E-05	0,742750050061133
95	5	9,99999999999996E-05	2,90684665059478E-05	0,735334338154668
95	6	9,99999999999955E-05	2,82474004390706E-05	0,735342766586723
95	7	9,79171015464526E-05	2,87487801957228E-05	0,736560114940698
95	8	9,61166539358255E-05	2,87487783182369E-05	0,737695019990604

95	9	9,99999999999955E-05	2,24213896898028E-05	0,737588217386027
95	10	9,99999999999955E-05	2,87487792949943E-05	0,735328559262719
96	1	9,99999999999980E-05	3,22880726850708E-05	0,736036346079241
96	2	9,99999999999985E-05	1,72069941918542E-05	0,742820641903358
96	3	9,99999999999981E-05	1,90926049618127E-05	0,740580559061391
96	4	9,99999999999888E-05	3,28989531605751E-05	0,736337997297857
96	5	9,99999999999921E-05	2,80871266421466E-05	0,735353302538695
96	6	9,99999999999963E-05	3,11383485121623E-05	0,735651280746232
96	7	9,99999999999981E-05	2,55645953516430E-05	0,735901462133073
96	8	9,67306837267040E-05	2,87487793727286E-05	0,737300708937601
96	9	9,99999999999999E-05	2,45967719442485E-05	0,736302394841406
96	10	9,99999999999913E-05	3,02354370546858E-05	0,735453492949863
97	1	9,89387110455220E-05	2,87487783395693E-05	0,735944678517009
97	2	9,99999999999955E-05	2,93585484004524E-05	0,735349580534896
97	3	9,99999999999985E-05	2,02131245597846E-05	0,73943555876088
97	4	9,98225421625366E-05	2,80899649856923E-05	0,735450179716221
97	5	9,99999999999888E-05	3,00184642506478E-05	0,735419689862684
97	6	9,99999999999955E-05	2,98987156825058E-05	0,735403312178576
97	7	9,99999999999888E-05	2,87487783602757E-05	0,735328559262718
97	8	9,12921225876149E-05	2,87487783200329E-05	0,741080863798021
97	9	9,74712691931490E-05	2,85879164948568E-05	0,736819774420322
97	10	9,86491143961976E-05	2,87487806753932E-05	0,736116679609949
98	1	9,99999999999814E-05	1,80286997372131E-05	0,741796311529162
98	2	9,99999999999969E-05	2,63113191888942E-05	0,735664316788818
98	3	9,99999999999995E-05	2,35004919463772E-05	0,736883934345052
98	4	9,99999999999981E-05	3,07661014788001E-05	0,735558581456003
98	5	9,99999999999950E-05	2,80828772422433E-05	0,735353621399397
98	6	9,99999999999955E-05	2,70535510743686E-05	0,735490983493789
98	7	9,99999999999995E-05	2,87487807010373E-05	0,735328559262724
98	8	9,99999999999981E-05	3,19981658197363E-05	0,735925190443672
98	9	9,99999999999888E-05	2,87487783604477E-05	0,735328559262718

98	10	9,99999999999955E-05	2,87487783393974E-05	0,735328559262714
99	1	9,99999999999888E-05	2,81930576902538E-05	0,735346013541474
99	2	9,99999999999955E-05	2,87487783577270E-05	0,735328559262714
99	3	9,99999999999955E-05	3,12087995042600E-05	0,73567058579826
99	4	9,99999999999984E-05	3,04885794581299E-05	0,735499654773131
99	5	9,99999999999955E-05	2,84188347871557E-05	0,735334711338442
99	6	9,99999999999997E-05	2,76044847907474E-05	0,735402568251967
99	7	9,99999999999908E-05	2,92711814702850E-05	0,735343988735344
99	8	9,99999999999986E-05	2,90795563693254E-05	0,735334745981936
99	9	9,99999999999955E-05	2,79787272410330E-05	0,735362074588156
99	10	9,99999999999955E-05	2,63037639731689E-05	0,735666401022608
100	1	9,99999999999969E-05	3,08837482366526E-05	0,735586187257967
100	2	9,95861008487535E-05	2,87487783577270E-05	0,735566552131101
100	3	9,99999999999988E-05	2,96232442467097E-05	0,735371789332431
100	4	9,89703243970444E-05	3,55766927628019E-05	0,738936176552114
100	5	9,99999999999955E-05	2,91080925368978E-05	0,735335859312408
100	6	9,96316846823732E-05	2,60082303029842E-05	0,735927110887094
100	7	9,99999999999955E-05	3,37101793766181E-05	0,736757039546547
100	8	9,99999999999980E-05	2,87392098014160E-05	0,73532856438793
100	9	9,67452004176573E-05	2,87487783577270E-05	0,737291479054011
100	10	9,99999999999955E-05	2,87487792906109E-05	0,735328559262719

X_1 = 9,99999999999955e-05 X_2 = 2,874877833956931e-05

$Best\ Solution \longrightarrow RMSE = 0,73532856$