

Implantação de infraestrutura de pesquisa em formulação e desenvolvimento de combustíveis para a indústria do transporte na Universidade Federal de Santa Catarina

Chamada CNPq/MCTI/FNDCT N° 18/2021 - UNIVERSAL

Prof. Leonel R. Cancino, Dr. Eng.

Centro Tecnológico de Joinville
Universidade Federal de Santa Catarina
leonel.cancino@labmci.ufsc.br

Laboratório de Motores de Combustão Interna
Grupo de Pesquisa em Eficiência Energética de Sistemas Veiculares

Joinville - SC, Setembro de 2021

Sumário

1	Identificação do projeto	4
2	Dados do proponente e equipe	4
2.1	Proponente	4
2.2	Equipe executora do projeto	4
2.3	Instituições participantes	6
3	Áreas do conhecimento predominantes	6
4	Introdução	7
5	Objetivos	8
5.1	Objetivo geral	8
5.2	Objetivos específicos	8
6	Revisão bibliográfica	9
6.1	Tecnologias de combustão / ignição da mistura em motores de combustão interna	9
6.2	Experimentos fundamentais em combustão / motores de combustão interna	11
6.2.1	Tubo de choque	11
6.2.2	Motor com taxa de compressão variável (CFR) e MCI com acesso óptico	12
6.2.3	Máquina de compressão rápida	13
7	Metodologia	13
7.1	Projeto, dimensionamento, construção e validação da máquina de compressão rápida	14
7.1.1	Projeto e dimensionamento	15
7.1.2	Construção / fabricação de componentes da máquina de compressão rápida	15
7.1.3	Montagem da máquina de compressão rápida	16
7.1.4	Validação da máquina de compressão rápida	16
7.2	Instrumentação dos motores de 4 cilindros (combustíveis líquidos e gasosos)	16
8	Cronograma	16
9	Relevância e impacto do projeto para o desenvolvimento científico e tecnológico	17
10	Informações complementares do projeto de pesquisa	18
10.1	Histórico de cooperação internacional	18
10.1.1	Cooperação UFSC - C3/NUIG	18
10.1.2	Cooperação UFSC - IVG/UDE	19
11	Recursos financeiros disponíveis de outras fontes aprovados para aplicação no projeto	20
11.1	Recursos financeiros disponíveis - UFSC	20
11.2	Recursos financeiros disponíveis - AVL-Advanced Simulation Technologies™	20
11.3	Recursos financeiros disponíveis - Contribuição das instituições colaboradoras	20
11.4	Recursos financeiros disponíveis - Contribuição da indústria local (Joinville, SC)	20

Lista de Figuras

1	Sistemas de ignição da mistura em motores de combustão interna e a sua relação com a reatividade do combustível	10
2	Processo de validação/otimização de mecanismos cinéticos	10
3	Operação do tubo de choque (Cancino, 2009)	12
4	Máquina de compressão rápida a) pistão simples, b) duplo pistão	13
5	Dados experimentais de atraso de ignição (ainda não publicados) a) Medição do atraso de ignição usando o historio de pressão, b) Tendencias de atraso de ignição em tubo de choque e máquina de compressão rápida	13
6	Máquina de compressão rápida - RCM (Configuração de máquina de compressão rápida similar à configuração da RCM da Universidade Nacional de Irlanda, Galway, Irlanda	14
7	Coletânea de imagens da máquina de compressão rápida da Universidade de Michigan (Imagens tomadas da página web da bancada e de Karwat <i>et al.</i> (2011)	14
8	Imagem ilustrativa da bancada de máquina de compressão rápida a ser construída nesta proposta de pesquisa	16
9	Motores de combustão interna ciclo Otto, disponíveis para instrumentação de pressão em câmara de combustão. (a) Motor 4 cilindros, taxa de compressão alta, combustíveis líquidos. (b) Motor 4 cilindros, combustíveis gasosos	17
10	Cronograma de atividades	17
11	Registros fotográficos da visita no C3/NUIG, junho de 2018. Tubo de choque de alta pressão, máquina de compressão rápida, componentes periféricos e diafragma usados em experimentos de atraso de ignição	19
12	Registos fotográficos da visita no IVG/UDE, Fevereiro de 2018. Fotografias do tubo de choque, componentes e diafragmas usados nos experimentos de atraso de ignição	19
13	Orçamento solicitado ao CNPq nesta proposta de pesquisa	21

Lista de Tabelas

1	Equipe executora	5
---	----------------------------	---

1 Identificação do projeto

Título: Implantação de infraestrutura de pesquisa em formulação e desenvolvimento de combustíveis para a indústria do transporte na Universidade Federal de Santa Catarina

Palavras chave: Combustíveis, Eficiência energética, Máquina de compressão rápida, Motores de combustão interna

Resumo: O cenário mundial do uso de Motores de Combustão Interna (MCI) na indústria do transporte está passando por uma reformulação / adaptação, motivada por regulamentações mais estritas para emissões e pelo amadurecimento de diferentes tecnologias aplicadas a sistemas de propulsão, como é o caso das baterias para veículos elétricos. O Brasil é pioneiro na produção e uso de biocombustíveis, como etanol e biodiesel, e a presente proposta vem contribuir com as metas de mitigação de impactos ao meio ambiente e com o desenvolvimento de uma cadeia sustentável de produção e consumo de combustíveis renováveis para o transporte e a geração de energia. Este projeto visa implantar uma infraestrutura para pesquisa e desenvolvimento em formulação de combustíveis e biocombustíveis na Universidade Federal de Santa Catarina, a fim de elucidar a influência da resistência à detonação dos combustíveis na operação de motores em regimes HCCI e PCCI. O aparato experimental consistirá em uma máquina de compressão rápida (RCM), dois motores de combustão interna (já disponíveis na UFSC) e os respectivos sistemas de instrumentação para medir pressão na câmara de combustão. Em especial, a máquina de compressão rápida será projetada, dimensionada, fabricada e validada ao longo da execução desta proposta, em parceria com indústrias da região de Joinville, SC. Os resultados esperados desse projeto englobam o estabelecimento da infraestrutura supracitada, a obtenção de uma extensa base de dados para aperfeiçoamento do projeto de motores HCCI e PCCI, a elaboração de mecanismos de cinética química detalhada para combustíveis e biocombustíveis de interesse nacional, além de publicações em periódicos com elevado fator de impacto e a formação de recursos humanos altamente qualificados para atuação na indústria.

2 Dados do proponente e equipe

2.1 Proponente

Prof. Leonel Rincón Cancino, Dr. Eng.
Laboratório de Motores de Combustão Interna
Grupo de Pesquisa em Eficiência Energética de Sistemas Veiculares
Centro Tecnológico de Joinville
Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Joinville.

CV Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1305995640333184>
Site LABMCI: <http://labmci.ufsc.br/>
Site Pessoal: <http://leonelcancino.paginas.ufsc.br/>
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8435-9026>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26321361200>

2.2 Equipe executora do projeto

A equipe executora desta proposta é composta por mais de 15 membros, entre professores pesquisadores, técnicos de laboratório, alunos de mestrado e doutorado assim como dois membros de instituições internacionais, todos com excelente formação nas diferentes áreas de atuação como pode ser verificado nos CV Lattes dos participantes.

A equipe de pesquisa envolve quatro instituições de referência a nível nacional e internacional na área de combustão, formulação e desenvolvimento de combustíveis e com experiência na operação de bancadas de teste para experimentos de atraso de ignição. A Tabela 1 mostra os nomes, função, instituição e link do CV de cada integrante.

Tabela 1: *Equipe executora*

Equipe executora			
No Brasil			
Nome	Função	Instituição	Link cv
Prof. Leonel R. Cancino, Dr.Eng.	Coordenador do projeto, Apoio científico na(s) área(s): Ciências térmicas, Combustão / Cinética química / CFD / MCI / RCM	UFSC (Joinville)	CV Lattes
Prof. Amir A.M. de Oliveira Jr, Ph.D	Pesquisador, Apoio científico na(s) área(s): Ciências térmicas, Combustão / Cinética química / MCI	UFSC (Florianópolis)	CV Lattes
Prof. Amir R. De Toni Jr, Dr.Eng	Pesquisador, Apoio científico na(s) área(s): Ciências térmicas, Combustão / Cinética química / CFD / RCM	UFRGS (Litoral N)	CV Lattes
Prof. Antônio O. Dourado, Dr.Eng	Pesquisador, Apoio científico na(s) área(s): Análise e projeto mecânico / Controle / Metrologia e instrumentação	UFSC (Joinville)	CV Lattes
Prof. Jorge L.G. Oliveira, Dr.Eng	Pesquisador, Apoio científico na(s) área(s): Ciências térmicas / Transferência de calor e massa	UFSC (Joinville)	CV Lattes
Prof. Kleber V. de Paiva, Dr.Eng	Pesquisador, Apoio científico na(s) área(s): Ciências térmicas / Transferência de calor e massa	UFSC (Joinville)	CV Lattes
Prof. Marcos A. Rabelo, Dr.Eng	Pesquisador, Apoio científico na(s) área(s): Análise e projeto mecânico / Projeto de sistemas mecânicos	UFSC (Joinville)	CV Lattes
Prof. Modesto H. Ferrer, Dr.Eng	Pesquisador, Apoio científico na(s) área(s): Análise e projeto mecânico / Projeto de sistemas mecânicos / Fabricação / Metalurgia	UFSC (Joinville)	CV Lattes
Prof. Rafael de C. Catapan, Dr.Eng	Pesquisador, Apoio científico na(s) área(s): Ciências térmicas, Combustão / Cinética química	UFSC (Joinville)	CV Lattes
Prof. Sérgio Junichi Idehara Dr.Eng	Pesquisador, Apoio científico na(s) área(s): Análise e projeto mecânico / Projeto de sistemas mecânicos	UFSC (Joinville)	CV Lattes
Gilson Nunes Maia, Tec. Mec.	Técnico Mecânico, Apoio Técnico na(s) área(s): Mecânica, Automotiva, Fabricação	UFSC (Florianópolis)	CV Lattes
Gabriel de A.J. Gonini, Eng.	Mestrando, Apoio científico / Técnico na(s) área(s): Ciências térmicas / CFD / Combustão	UFSC (Florianópolis)	CV Lattes
Javier Mendoza Corredor, Eng.	Mestrando, Apoio científico / Técnico na(s) área(s): Ciências térmicas / Transferência de calor / Combustão	UFSC (Florianópolis)	CV Lattes
John Adilson Henschel Junior, Eng.	Mestrando, Apoio científico / Técnico na(s) área(s): Ciências térmicas / CFD / Combustão	UFSC (Joinville)	CV Lattes
Milton Keisy Kouketsu, Eng.	Mestrando, Apoio científico / Técnico na(s) área(s): Ciências térmicas / CFD / Combustão	UFSC (Joinville)	CV Lattes

Laura Meneses Barrera, Eng.	Mestranda, Apoio científico / Técnico na(s) área(s): Ciências térmicas / Combustão	UFSC (Florianópolis)	CV Lattes
Felipe da Costa Kraus, M.Eng.	Doutorando, Apoio científico / Técnico na(s) área(s): Ciências térmicas / Transferência de calor / Combustão	UFSC (Florianópolis)	CV Lattes

No Exterior

Nome	Função	Instituição	Web Site
Prof. Henry Curran, Ph.D	Pesquisador, Apoio científico na(s) área(s): Ciências térmicas, Combustão / Cinética química / RCM	NUIG (Irlanda)	C3/NUIG
Prof. Christof Schulz, Ph.D	Pesquisador, Apoio científico na(s) área(s): Ciências térmicas, Combustão / Cinética química	UDE (Alemanha)	IVG/UDE

RCM = Máquina de compressão rápida, CFD = Dinâmica de fluidos computacional

MCI = Motores de Combustão interna

UFSC = Universidade Federal de Santa Catarina (Instituição executora)

UFRGS = Universidade Federal de Rio Grande do Sul (Instituição colaboradora)

NUIG = Universidade Nacional da Irlanda, Galway (Instituição colaboradora)

UDE = Universidade de Duisburg-Essen, Alemanha (Instituição colaboradora)

2.3 Instituições participantes

Quatro instituições de educação superior (duas nacionais e duas internacionais) fazem parte desta proposta. A instituição de execução desta proposta é a Universidade Federal de Santa Catarina.

- Universidade Federal de Santa Catarina
 - ✓ [Laboratório de Motores de Combustão Interna - LABMCI](#)
 - ✓ [Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos - LABCET](#)
 - ✓ [Laboratório de Combustão e Catálise Aplicadas - LAC](#)
 - ✓ [Laboratório de Sistemas Veiculares - LSV](#)
 - ✓ [Laboratório Termal Fluid Flow Group - T2F](#)
- Universidade Federal de Rio Grande do Sul
 - ✓ [Laboratório de Ensaio Térmicos e Aerodinâmicos - LETA](#)
- Universidade Nacional de Irlanda, Galway
 - ✓ [Combustion Chemistry Centre - C3/NUIG](#)
- Universidade de Duisburg-Essen, Alemanha
 - ✓ [Institute for Combustion and Gas Dynamics - Reactive Fluids - IVG/UDE](#)

3 Áreas do conhecimento predominantes

As áreas do conhecimento - (Tabela CNPq) predominantes desta proposta de pesquisa são:

- 1.06.03.01-8 Cinética Química e Catálise
- 1.06.03.08-5 Termodinâmica Química
- 3.05.01.01-6 Transferência de Calor
- 3.05.01.02-4 Mecânica dos Fluidos

-
- 3.05.02.03-9 Aproveitamento da Energia
 - 3.05.04.05-8 Máquinas, Motores e Equipamentos
 - 3.06.03.03-0 Álcool
 - 3.06.03.16-1 Petróleo e Petroquímica
 - 3.12.05.01-1 Combustão e Escoamento com Reações Químicas
 - 3.12.05.04-6 Motores Alternativos

4 Introdução

O cenário mundial do uso de Motores de Combustão Interna (MCI) na indústria do transporte está passando por uma reformulação / adaptação, motivada por regulamentações mais estritas para emissões e pelo amadurecimento de diferentes tecnologias aplicadas a sistemas de propulsão, como é o caso das baterias para veículos elétricos. A demanda de energia para a indústria do transporte envolve mais de 1,2 bilhão de veículos de pequeno e médio porte, e 380 milhões de veículos pesados, totalizando uma demanda global de combustível líquido que excede 11 bilhões de litros por dia (envolvendo gasolina e óleo diesel automotivo, querosene de aviação e óleo diesel naval). A partir destes dados é possível entender que, atualmente, não existe uma alternativa aos motores de combustão interna que consiga atender a ampla maioria das aplicações na indústria do transporte.

Caracterizações equivocadas de processos de combustão têm levado parte da opinião pública a acreditar que os MCIs estão se tornando uma tecnologia obsoleta. Os motores de combustão interna seguem em contínua evolução, lançando desafios à comunidade científica, gerando competitividade na indústria e produzindo novas tecnologias. Ademais, veículos com sistema de propulsão não-convencionais (por exemplo, veículos elétricos) enfrentam grandes barreiras para uma adoção rápida. Desse modo, o futuro da mobilidade em médio prazo consistirá em um cenário que inclui veículos convencionais (empregando MCIs) e veículos elétricos / combustíveis alternativos, em função da aceitação pelos consumidores, infraestrutura da região / país, aplicação, entre outros aspectos.

Este processo de reformulação do uso de motores de combustão interna na indústria do transporte baseia-se em dois grandes pilares: (i) aperfeiçoamento dos diferentes subsistemas do motor, incluindo o próprio sistema de combustão; e (ii) formulação e desenvolvimento de combustíveis de alta performance / bio-combustíveis, os quais visam contribuir para redução do consumo de combustível e para um balanço de carbono mais favorável. Salienta-se que essas duas abordagens são complementares. Por exemplo, grandes indústrias nacionais e internacionais estão assinando projetos colaborativos de pesquisa para buscar soluções na reformulação do MCI (NDMais, 2021), enquanto outros *stakeholders* a nível mundial estão investigando a formulação e desenvolvimento de combustíveis para a indústria do transporte.

O Brasil é pioneiro na produção e uso de biocombustíveis, como etanol e biodiesel, e a presente proposta vem contribuir com as metas de mitigação de impactos ao meio ambiente, incluindo a redução da produção de gases promotores de efeito estufa, e com o desenvolvimento de uma cadeia sustentável de produção e consumo de combustíveis renováveis para o transporte e a geração estacionária de energia.

No mercado nacional, o combustível composto por uma mistura de etanol e gasolina é comercialmente disponível em proporção de cerca de 27 % de etanol, porém, é utilizado nos motores flex em diferentes proporções, que variam de 27 % etanol até 100 % etanol. Embora a produção de motores adaptados a operação com etanol já exista há mais de quatro décadas, a pesquisa básica nas características de combustão de etanol e misturas de etanol/gasolina não tem acompanhado o andamento das tecnologias de controle do motor. Assim, grande parte do desenvolvimento de motores e tecnologias de combustão tem se baseado em procedimentos empíricos, os quais são limitados por critérios de custo e tempo de desenvolvimento. Por exemplo, o uso de etanol motores de ignição por compressão (ciclo Diesel) ainda não chegou ao mercado, pois o desenvolvimento de motores tem se concentrado em sistemas de ignição por centelha para combustíveis “leves”, típicos de motores de ciclo Otto (etanol e misturas de etanol e gasolina automotiva). Por sua vez, o desenvolvimento de motores de ignição por compressão tem se focado no uso de combustíveis com maior massa molecular.

O desenvolvimento de conhecimentos fundamentais acerca das características de combustão destes combustíveis nas condições típicas de motores a combustão interna trará a possibilidade de otimizações de desempenho e eficiência, proporcionando consideráveis ganhos econômicos, ambientais e estratégicos para o Brasil. Do ponto de vista ambiental, ainda que os fatores de emissão dos veículos novos estejam decrescendo (CETESB, 2019), o aumento da frota e os congestionamentos das vias comprometem em parte os avanços tecnológicos obtidos ao longo das últimas décadas.

Entre os focos de desenvolvimento tecnológico a nível nacional e internacional está a pesquisa em motores de combustão interna (MCI) operando em condições de carga homogênea de ignição por compressão - HCCI e/ou

motores de carga parcial pré-misturada de ignição por compressão (*Partially Premixed Charge Compression Ignition* - PCCI). Estes sistemas tem gerado desafios em várias áreas da engenharia (controle e automação, química, mecânica, automotiva, entre outras) sendo o principal desafio o controle do processo de combustão em regime H/P-CCI nas diversas condições de operação do motor. Diversos fabricantes têm divulgado projetos de veículos equipados com motores HCCI, mas todos esses lançamentos foram adiados, justamente pela dificuldade no controle e estabilidade do processo de combustão. A previsão de lançamento mais recente foi da Mazda, para o 2019 (Stoklosa, 2017), porém, até o presente (set/2021) ainda não foi concretizada.

A lacuna de conhecimento que inviabiliza a consolidação de motores H/P-CCI, tanto a etanol quanto a gasolina, está relacionada com a elucidação dos fenômenos de atraso de ignição (eventos cinéticos prévios à ignição térmica da mistura) e sua relação com o índice de octanas desses dois combustíveis e das suas misturas. A saber, quanto maior for o índice de resistência à detonação da mistura, maior poderá ser a taxa de compressão, o que resulta em motores termodinamicamente mais eficientes (Heywood, 2018; Kalghatgi & Head, 2006). Em relação à ignição térmica, sua avaliação é feita pela determinação do chamado atraso de ignição (*Ignition Delay Time* - IDT), sendo este dado obtido via experimentos em tubos de choque e máquina de compressão rápida. Estes equipamentos permitem reproduzir condições de temperatura e pressão similares às condições de operação dos motores de combustão interna (ignição por faísca / ignição por compressão / H/P-CCI), de modo que os dados obtidos possam ser empregados no ajuste de modelos de cinética química detalhada. De posse desses modelos detalhados é possível realizar simulações numéricas complexas.

Em relação aos índices de resistência à detonação (RON, MON, e AKI), seus valores podem tanto ser obtidos experimentalmente em motor CFR (*Cooperative Fuel Research Engine*), quanto estimados em função da composição do combustível (conteúdo de parafinas, olefinas, aromáticos, e demais classes de hidrocarbonetos) usando bases de dados experimentais. Em termos de operação dos motores CFR, sua construção permite o controle da razão de compressão, de modo a “mapear” o regime de detonação bem como aproximar um regime de operação H/P-CCI.

O estudo das condições de operação de motores H/P-CCI é indissociável do desenvolvimento de substitutos de combustíveis (*fuel surrogates*) para a indústria do transporte, assim como desenvolvimento de novas tecnologias de combustão aplicadas a motores de combustão interna. Salienta-se que esta pesquisa tem um apelo ambiental, de aperfeiçoamento de processos tecnológicos para o país e de desenvolvimento de recursos humanos qualificados.

5 Objetivos

5.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta proposta é implantar a infraestrutura básica de pesquisa em formulação e desenvolvimento de combustíveis para a indústria do transporte na Universidade Federal de Santa Catarina. A referida infraestrutura de pesquisa será utilizada para desenvolvimento de modelos cinéticos de combustão para substitutos de combustíveis (e biocombustíveis) adequados para simulações numéricas de sistemas complexos de combustão, como por exemplo, motores de combustão interna de carga homogênea / pré-misturada e ignição por compressão - H/P-CCI.

Conforme será detalhado na seção **11 Recursos disponíveis, Contrapartidas e Recursos necessários**, o valor total desta proposta (implantação da infraestrutura de pesquisa) ultrapassa o valor máximo possível de ser solicitado nesta chamada (Chamada CNPq/MCTI/FNDCT N° 18/2021 - UNIVERSAL), desta forma, o recurso solicitado ao CNPq é o necessário para a instrumentação básica em termos de medição de pressão (em câmara de combustão nas bancadas) e medição/controle de temperatura.

5.2 Objetivos específicos

A implantação da infraestrutura básica de pesquisa consiste na fabricação, montagem, e instrumentação de uma máquina de compressão rápida e na instrumentação de dois motores de combustão interna, delineando desta forma os seguintes objetivos específicos desta proposta:

1. Projetar, dimensionar, fabricar e instrumentar uma máquina de compressão rápida, no **Laboratório de Motores de Combustão Interna - LABMCI/CTJ/UFSC Joinville**, para medições de atraso de ignição térmica de combustíveis (origem fóssil e biocombustíveis) reais e substitutos. Esta bancada será projetada e dimensionada pela equipe executora desta proposta, fabricada com o apoio da indústria local (Região de Joinville, SC) e validada para testes de ignição térmica de combustíveis, empregando dados de referência

de instituições de pesquisa internacionais participantes desta proposta. As medições de atraso de ignição serão feitas por medição de pressão dinâmica via sistema de aquisição de dados com transdutor de pressão piezoelétrico, adaptado à câmara de compressão da máquina.

2. Instrumentar um motor de 4 cilindros, de ignição por centelha (com alta razão de compressão) já disponível no **Laboratório de Motores de Combustão Interna - LABMCI/CTJ/UFSC Joinville**. A instrumentação deste motor consistirá em adaptar um sensor de pressão à câmara de combustão de um dos cilindros, no intuito de obter dados de pressão durante a operação. O sistema de aquisição de dados será o mesmo descrito no item anterior (Máquina de compressão rápida). Os dados de pressão coletados serão usados para analisar os parâmetros de performance do motor operando com diferentes combustíveis (fósseis e biocombustíveis).
3. Instrumentar um motor de 4 cilindros, ignição por centelha, combustível gasoso, já disponível no **Laboratório de Motores de Combustão Interna - LABMCI/CTJ/UFSC Joinville**. A instrumentação deste motor consistirá em adaptar um sensor de pressão à câmara de combustão de um dos cilindros, no intuito de obter dados de pressão durante a operação. O sistema de aquisição de dados será o mesmo descrito anteriormente (Máquina de compressão rápida). Os dados de pressão coletados serão usados para analisar os parâmetros de performance do motor operando com diferentes combustíveis gasosos (fósseis e biocombustíveis).

As três bancadas listadas acima serão utilizadas para obtenção de dados de atraso de ignição térmica e parâmetros de performance (potência, torque, consumo específico, pressão média específica) em motores. Estes dados experimentais permitirão o desenvolvimento de modelos cinéticos de combustão para substitutos de combustíveis (e biocombustíveis) adequados para simulações numéricas de sistemas complexos de combustão, como por exemplo, motores de combustão interna de carga homogênea / pré-misturada e ignição por compressão - H/P-CCI.

6 Revisão bibliográfica

6.1 Tecnologias de combustão / ignição da mistura em motores de combustão interna

Na área de motores de combustão interna - MCI, é abundante a literatura que pode ser encontrada, dada a importância dos MCIs para a indústria e a economia mundial nos últimos 125 anos. Como exemplo, os livros de Heywood, Merker e Baumgarten (Baumgarten (2006); Brunetti (2012); Heywood (2018); Merker *et al.* (2012) e as referências citadas nestes livros - mais de 500 referências bibliográficas) deixam claro que pesquisadores têm dedicado esforços na descrição da operação / otimização de motores de combustão interna, e em especial aos sistemas de ignição de mistura ar / combustível tradicionais (ignição por compressão e ignição por centelha), tanto do ponto de vista experimental como numérico / computacional. Várias estratégias de combustão em motores de combustão interna tem sido pesquisadas a nível mundial:

- Motor de ignição por centelha (*Spark Ignition* - SI)
- Motor de ignição por compressão de injeção direta (*Compression Ignition Direct Injection* - CIDI)
- Motor de carga homogênea de ignição por compressão (*Homogeneous Charge Compression Ignition* - HCCI)
- Motor de carga parcial pré-misturada de ignição por compressão (*Partially Pre-mixed Charge Compression Ignition* - PCCI)

Sendo as duas primeiras as mais estudadas ao longo dos anos (motor ciclo Otto e motor ciclo Diesel, respectivamente). Recentemente, as duas últimas tecnologias de combustão listadas têm recebido maior atenção dos pesquisadores pelas suas possibilidades de redução de emissões. No caso dos motores de carga homogênea de ignição por compressão (*Homogeneous Charge Compression Ignition* - HCCI) a tendência é aproveitar a possibilidade da autoignição da mistura em elevada razão de compressão (típicas dos motores de ignição por compressão). A Figura 1 mostra os dois limites, em termos de sistemas de ignição, impostos principalmente pelas características de reatividade dos combustíveis convencionais.

Os dois limites, conhecidos como ciclo Otto e ciclo Diesel, diferenciam-se em termos da cinética química, inicialização, e evolução do processo de combustão. Observa-se que entre estes extremos existe uma ampla faixa



Figura 1: Sistemas de ignição da mistura em motores de combustão interna e a sua relação com a reatividade do combustível

de possibilidades em termos de sistemas de combustão / ignição a serem exploradas, entre elas as tecnologias de combustão em regime de H/P-CCI. Vários autores têm focado esforços no desenvolvimento de novas tecnologias de combustão, entre elas a tecnologia de combustão H/P-CCI (Duan *et al.* (2021); El Shenawy *et al.* (2019); Fatouraie *et al.* (2016); Fikri *et al.* (2013); Kalghatgi & Head (2006); Kozarac *et al.* (2014, 2016); Maurya & Agarwal (2014); Merker *et al.* (2012); Natarajan *et al.* (2017); Polat (2016); Saxena & Bedoya (2013); Soloiu *et al.* (2018) e as referências citadas nesses trabalhos), na qual o processo de ignição da mistura ocorre por compressão e de forma distribuída no cilindro.

As maiores dificuldades encontradas pelos pesquisadores estão relacionadas com a carência de dados experimentais de atraso de ignição e índices de detonação dos combustíveis, bem como de modelos de cinética química que possam ser utilizados para simulações numéricas em programas computacionais (Cantera, CHEMKIN™, ANSYS-FLUENT™, AVL-Advanced Simulation Technologies™). A complementariedade das investigações experimentais com as simulações numéricas permite elucidar condições críticas em termos de controle do processo de combustão. Na Figura 2 mostra-se um esquema com as principais rotas da pesquisa em processos de combustão, na qual se destaca o uso de dados experimentais fundamentais na validação / otimização de mecanismos cinéticos.

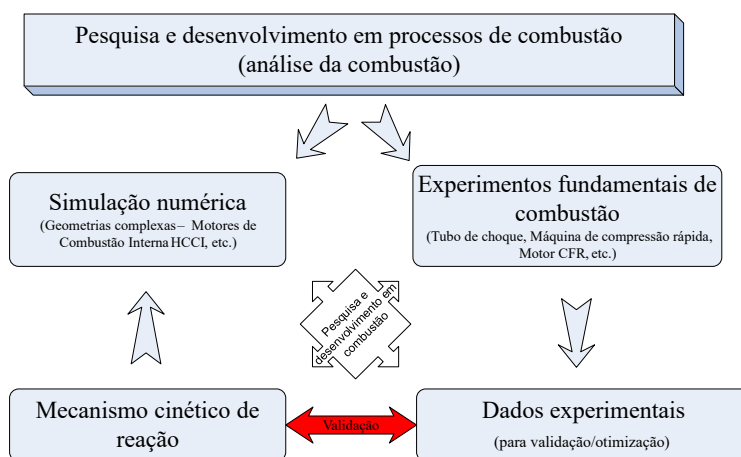


Figura 2: Processo de validação/otimização de mecanismos cinéticos

Em suma, a obtenção de resultados adequados nas simulações de processos de combustão depende fortemente da qualidade do mecanismo de cinética química empregado, que por sua vez depende de validação mediante dados obtidos em experimentos fundamentais (ignição em tubo de choque, ignição em máquina de compressão rápida, índice de resistência à detonação, concentração de espécies químicas intermediárias em reatores, entre outros.). Nota-se-se aqui a importância da infraestrutura laboratorial para obtenção de dados experimentais de ignição térmica em tubos de choque e máquina de compressão rápida.

Diversos são os modelos cinéticos detalhados disponíveis na literatura para combustíveis, hidrocarbonetos puros, e misturas de substitutos de gasolina (Cancino *et al.*, 2020; Cancino, 2009; De Toni *et al.*, 2017; De Toni, 2017) A maioria destes modelos foram desenvolvidos e validados com parâmetros medidos em experimentos

fundamentais de combustão, como por exemplo, ignição térmica em tubo de choque e máquina de compressão rápida, velocidade de chama plana laminar e evolução de espécies químicas em reatores perfeitamente misturados. Entretanto, muitos destes mecanismos precisam ser validados / otimizados fazendo comparações com dados experimentais (em diferentes condições de pressão, temperatura e estequiometria) ainda não disponíveis na literatura.

Estes modelos cinéticos detalhados são utilizados para simulações numéricas, incluindo simulações de motores H/P-CCI, (Cancino *et al.*, 2020; Fikri *et al.*, 2013) em programas computacionais que realizam a simulação do motor de forma simplificada, focando somente na cinética química e levando em conta parâmetros geométricos e de operação do motor (Cantera, CHEMKIN™), ou de forma mais completa, envolvendo modelos robustos de troca de calor e arrefecimento, escoamentos nos sistemas de admissão, exaustão, distribuição e controle, além da cinética química detalhada na câmara de combustão (AVL-Advanced Simulation Technologies™).

No Brasil são poucos os laboratórios / institutos de pesquisa dedicados a combustão e a infraestrutura laboratorial disponível no país para realizar estudos experimentais em combustão é bastante limitada. Nenhum instituto de pesquisa no Brasil possui tubo de choque de alta pressão ou máquina de compressão rápida validados experimentalmente para realização de testes de ignição térmica de combustíveis ou substitutos de combustíveis. A Universidade Federal de Minas Gerais está construindo um tubo de choque, uma dissertação de mestrado foi realizada (Santana, 2013), porém o documento não mostra validação experimental da bancada. A Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro possui uma máquina de compressão rápida, a qual tem sido utilizada para a realização de trabalhos acadêmicos (teses e dissertações). Entretanto, esta máquina de compressão rápida (fabricante TESTEM, modelo TeRCM k-84) opera de forma diferenciada, comprimindo e expandindo os gases da câmara de compressão, similar aos motores de ciclo Otto o Diesel, sem “travar” o pistão no volume de compressão mínimo (de Azevedo & Braga, 2014). A revisão bibliográfica realizada para esta proposta não encontrou publicações internacionais com dados de validação desta máquina de compressão rápida para testes de ignição térmica.

Institutos de pesquisa como o CENPES e o INMETRO (entre outros poucos) possuem motor CFR para testes de características antidetonantes em combustíveis, porém, com estes motores CFR no Brasil, não têm sido reportados estudos em regime de combustão H/P-CCI.

6.2 Experimentos fundamentais em combustão / motores de combustão interna

Do ponto de vista experimental, são várias as limitantes na realização e adequada coleta de dados experimentais em processos de combustão aplicados ao desenvolvimento de combustíveis automotivos e otimização do processo de combustão em motores a combustão interna. Por exemplo, tentar medir corretamente a concentração de espécies químicas, atraso de ignição ou temperatura de combustão em um motor a combustão interna, *in-situ*, ainda representa um desafio. Ao tentar obter dados como esses em um motor, existem vários fatores que podem afetar as medições: perda de calor nas paredes, reações químicas superficiais na câmara de combustão, recirculação de gases queimados, flutuações na temperatura de entrada da mistura reagente, turbulência e demais fenômenos fluidodinâmicos, entre outros.

As soluções atualmente empregadas tentam “isolar” os fenômenos de cinética química dos fenômenos fluido-dinâmicos, aproveitando-se da diferença de escalas temporais dos processos. Assim, busca-se analisar de forma “menos perturbada” a cinética química do processo de combustão em motores a combustão interna. Nesta direção, os dois principais métodos experimentais para o estudo da autoignição (período de indução térmica e evolução temporal de espécies químicas) de misturas combustíveis são o tubo de choque e a máquina de compressão rápida. Em termos de índice resistência à detonação, os testes mais comuns são conduzidos em motor CFR, e em termos de caracterização da combustão no cilindro, são empregados testes em motor de combustão interna com acesso óptico. A seguir são apresentadas breves descrições destes equipamentos e de sua operação.

6.2.1 Tubo de choque

Um tubo de choque para testes de ignição térmica em misturas reativas é composto por duas seções tubulares, conectadas fisicamente por um diafragma. Em um teste de ignição, uma das seções tubulares é preenchida com a mistura reagente a ser analisada (seção de baixa pressão ou seção de teste) e a outra seção tubular é pressurizada com gases inertes, usualmente argônio e/ou hélio (seção de alta pressão). Num determinado instante, o diafragma que conecta as duas seções se rompe, e a diferença de pressão resultante entre as duas seções gera uma série de ondas de compressão se propagando na direção da seção de testes. Estas ondas de compressão colapsam em um intervalo de tempo e espaço muito curto logo após da ruptura do diafragma, $t = 0.0$ s, formando uma onda de choque normal ao eixo de tubo, a qual vai se propagar na direção da mistura reativa. Esta onda, chamada

de onda de choque incidente, propaga-se com velocidade supersônica u_{iw} na seção de baixa pressão, conforme mostrado na Figura 3(a) e (b).

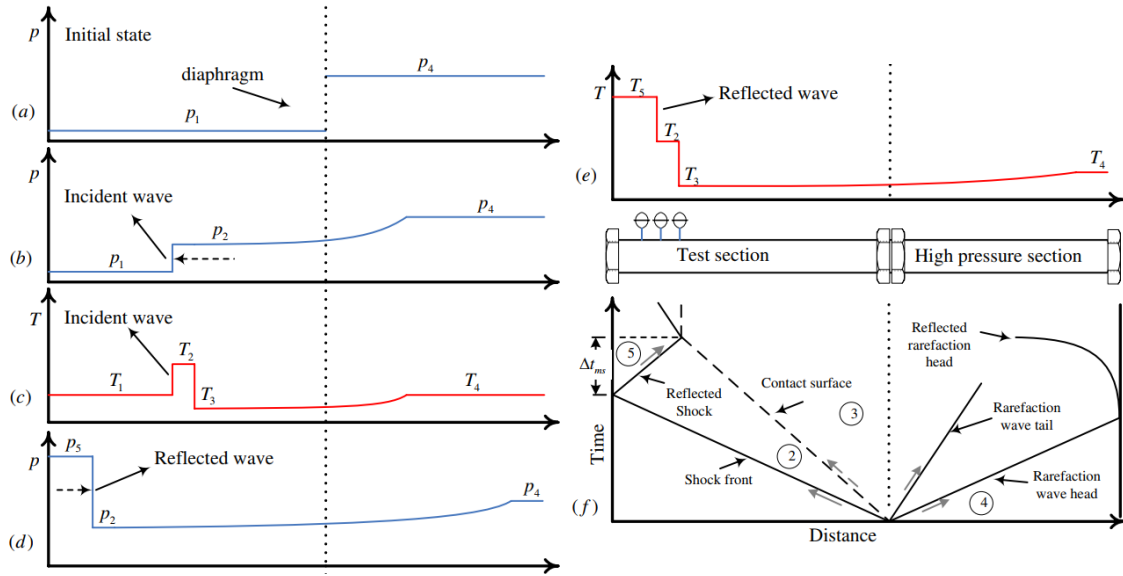


Figura 3: Operação do tubo de choque (Cancino, 2009)

A montante da onda incidente, a superfície de contato entre os gases contidos nas duas câmaras movimentar-se também na direção da onda incidente, com velocidade u_{cs} . A diferença entre u_{iw} e u_{cs} permite que o gás de teste (mistura reagente a ser analisada) atinja as condições de alta pressão e temperatura desejadas (p_5 e T_5) atrás da onda refletida e antes que a superfície de contato afete as condições uniformes, como representado na Figura 3(d) e (e). Simultaneamente, na seção de alta pressão, uma série de ondas de rarefação propaga-se em direção oposta dentro dos gases inertes em alta pressão e a chegada das ondas de rarefação também gera perturbações no gás de teste. O intervalo de tempo entre a passagem da onda refletida e a chegada da superfície de contato é o tempo disponível para medições, Δt_{ms} , representado na Figura 3(f). Quando as condições em ambos os lados da superfície de contato são favoráveis, a interação entre a superfície de contato e a onda refletida não gera ondas de choque adicionais, e a tendência da superfície de contato é de se manter em repouso. Este processo é chamado de “*tailoring*” do gás de alta pressão. Distribuições sucessivas de pressão no tempo, indicando a posição da onda de choque podem ser representadas em um gráfico $x - t$, formando o diagrama típico de distância-tempo, como mostrado na Figura 3(f), e comumente encontrado na literatura (Saad, 2020; Zel’dovich *et al.*, 2002).

6.2.2 Motor com taxa de compressão variável (CFR) e MCI com acesso óptico

O motor CFR (Cooperative Fuel Research Engine) e o motor de combustão interna com acesso óptico são utilizados para caracterização do combustível em termos de resistência à detonação e análise da combustão no interior do cilindro, respectivamente. O Motor CFR é patenteado e produzido pela empresa Waukesha (<http://www.waukeshafr.com/>). O emprego desse equipamento baseia-se em uma escala de combustíveis primários de referência - PRF e, mediante operação com razão de compressão variável, determinam-se os índices de detonação das amostras. Os testes ocorrem em duas etapas: inicialmente o combustível em estudo é ensaiado, variando-se a razão de compressão, até que se determine a condição de detonação; na segunda etapa, misturas de PRFs são ensaiadas até determinar-se qual composição sofre detonação na mesma razão de compressão observada na primeira etapa (da Silva Jr. *et al.*, 2019). Alguns institutos de pesquisa, como o CENPES e o INMETRO, possuem motores CFR para testes de características antidetonantes em combustíveis. Contudo, estes motores CFR não têm sido empregados para estudos em regime de combustão H/P-CCI.

Motores com acesso óptico são produzidos por diversos fabricantes, como a empresa austríaca AVL. De forma geral, estes motores possuem janelas em quartzo / cristal para acesso óptico no cilindro, possibilitando o emprego de métodos não intrusivos para a caracterização do processo de mistura, formação e propagação da chama, usando sistemas laser devidamente calibrados (PIV, LDA, PLIF, etc.)

6.2.3 Máquina de compressão rápida

A máquina de compressão rápida tem sido amplamente usada para análises de ignição térmica de combustíveis automotivos, pois esta simula o processo de compressão em condições semelhantes (pressão e temperatura) às encontradas em motores a combustão interna quando o pistão chega ao ponto morto superior. Podem ser encontradas duas configurações de máquinas de compressão rápida, de pistão simples ou de duplo pistão. Na primeira configuração, a mistura reagente é comprimida pela ação de deslocamento do pistão, e no caso de duplo pistão, a compressão da mistura é realizada pelo deslocamento dos pistões em direções opostas. A Figura 4 mostra as duas configurações.

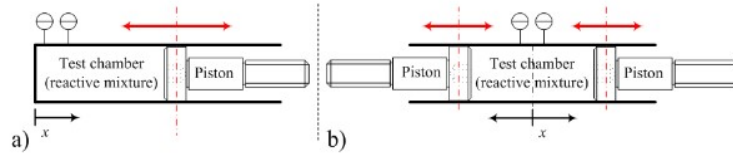


Figura 4: Máquina de compressão rápida a) pistão simples, b) duplo pistão

O princípio fundamental de uma máquina de compressão rápida é aquecer a mistura reagente até altos níveis de temperatura e pressão em um intervalo de tempo muito curto. A máquina de compressão rápida tem uma vantagem em relação ao tubo de choque, o tempo de medição é maior sem a interferência de ondas de choque refletidas. Como resultado, a máquina de compressão rápida permite estudos de ignição térmica em baixas temperaturas e pressões elevadas, nas condições em que a cinética química é muito lenta para ser analisada em tubos de choque. A faixa de temperaturas na operação de máquinas de compressão rápida varia entre 600 K até 1100 K (Mittal, 2006).

Em função do próprio processo de compressão (diminuição do volume via movimentação mecânica do pistão) o tempo de compressão da mistura até a pressão de compressão desejada é relativamente longo quando comparado ao tempo de compressão em tubos de choque. Isto gera condições propícias para que o sistema reativo “evolua” cineticamente ao longo da compressão. Um processo muito importante a ser levado em conta nos testes de ignição térmica em máquina de compressão rápida é a transferência de calor entre os gases as paredes da câmara de compressão, já que as RCM são projetadas para medições de atraso de ignição relativamente longos, dá tempo para que exista troca térmica entre os gases e as paredes da câmara. A Figura 5 mostra estes dois efeitos nas medições de atraso de ignição.

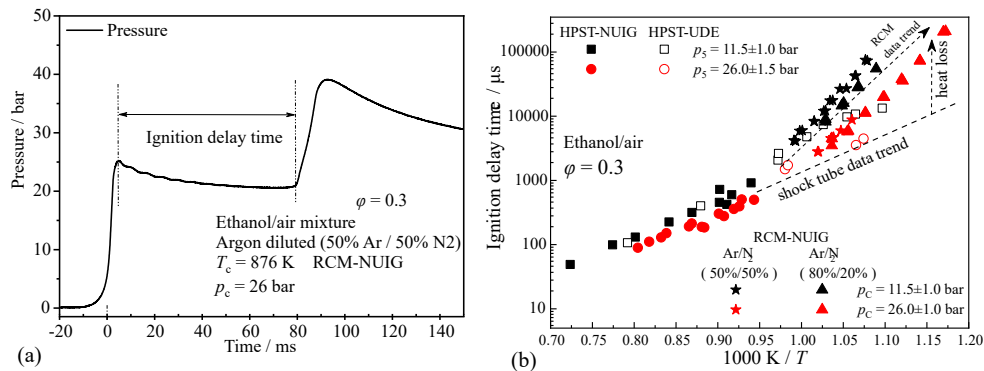


Figura 5: Dados experimentais de atraso de ignição (ainda não publicados) a) Medição do atraso de ignição usando o historio de pressão, b) Tendencias de atraso de ignição em tubo de choque e máquina de compressão rápida

7 Metodologia

Nesta seção é apresentada a metodologia a ser utilizada ao longo da execução deste projeto de pesquisa. Os diferentes procedimentos são então descritos como atividades na seção Cronograma.

7.1 Projeto, dimensionamento, construção e validação da máquina de compressão rápida

Para efeitos de projeto e dimensionamento serão analisadas as duas configurações de máquina de compressão rápida mostradas na Figura 4. A divisão de energia do *Argonne National Laboratory* organiza bianualmente o *International RCM Workshop*. O site deste Workshop disponibiliza informações relacionadas a testes de validação e configurações de máquinas de compressão rápida ao redor do mundo, desta forma a equipe executora tem uma base de dados de RCM validadas, assim como informações de testes padrão para validação de novas geometrias de RCM. Adicionalmente como ponto de partida, a equipe executora tem acesso aos dados de projeto da máquina de compressão rápida do *Combustion Chemistry Centre - C3/NUIG*. A Figura 6 mostra, ilustrativamente, a configuração da RCM/NUIG.

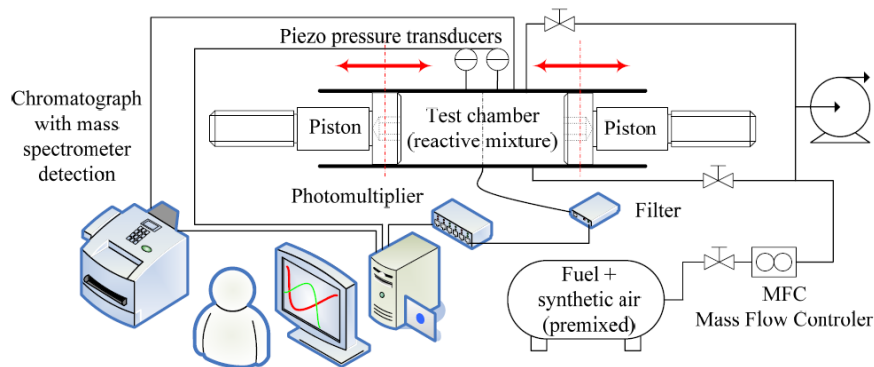


Figura 6: Máquina de compressão rápida - RCM (Configuração de máquina de compressão rápida similar à configuração da RCM da Universidade Nacional de Irlanda, Galway, Irlanda)

Outra bancada que será analisada é a máquina de compressão rápida da Universidade de Michigan. Esta bancada possui acesso óptico assim como acesso de amostragem para análises cromatográficas. A Figura 7

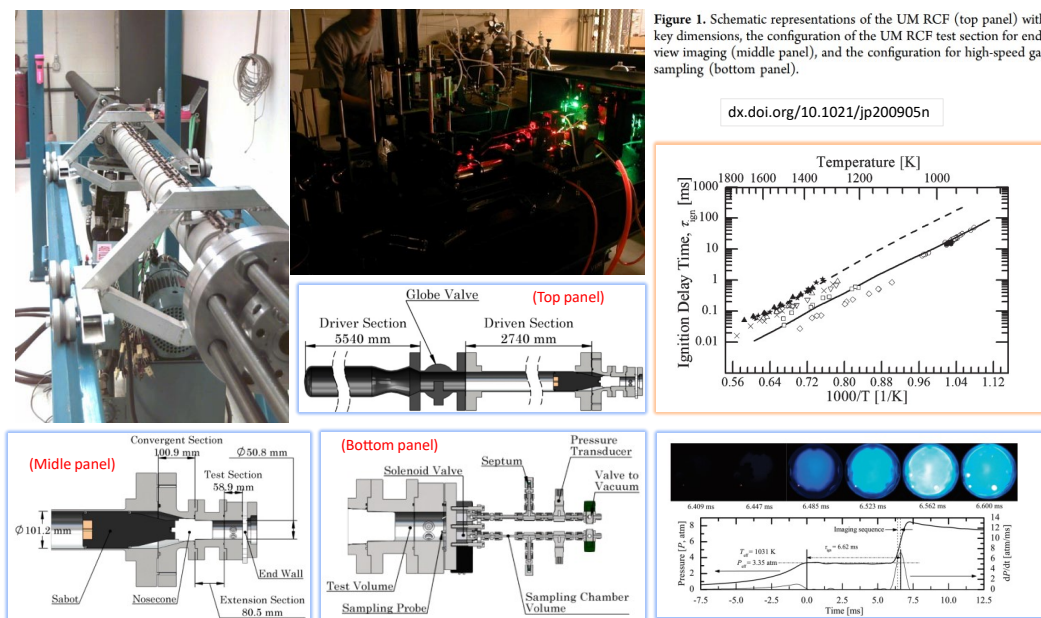


Figura 7: Coletânea de imagens da máquina de compressão rápida da Universidade de Michigan (Imagens tomadas da página web da bancada e de Karwat et al. (2011))

Está sendo feito o contato com a responsável pelo equipamento (Profa. Margaret Wooldridge, Ph.D) no intuito de obter detalhes do projeto e operação da bancada. Um dos aspetos mais importantes neste equipamento é a baixa influência da camada limite térmica ao longo do processo de compressão.

7.1.1 Projeto e dimensionamento

Simulações numéricas envolvendo análises zero dimensionais e multidimensionais utilizando ferramentas de simulação disponíveis no [Laboratório de Motores de Combustão Interna - LABMCI/CTJ/UFSC Joinville](#). Estas ferramentas serão utilizadas de forma sistemática no intuito de definir as dimensões e parâmetros de operação da máquina de compressão rápida. O projeto será realizado em várias etapas entre as quais podem ser listadas as seguintes:

- Definição da faixa de razões de compressão a ser utilizada nos testes. A máquina de compressão rápida será projetada para ajustar o valor da razão de compressão de teste, entre dois limites estabelecidos pelo volume mínimo da câmara de compressão. Aqui serão feitas simulações zero dimensionais usando [AVL-BOOST](#) e [Cantera](#)
- Definição de geometrias preliminares para análises em CRFD. Serão propostas e analisadas diversas geometrias da câmara e mecanismo de compressão usando dinâmica de fluidos computacional com reação química (*Computational Reactive Fluid Dynamics* - CRFD). Aqui serão feitas simulações multidimensionais usando [AVL-FIRE](#)
- Simulações com as geometrias mais promissoras em termos de baixa influência da camada limite térmica. Neste ponto, simulações CRFD mais detalhadas serão realizadas no intuito de definir a geometria final junto com os pontos de tomada de pressão, amostragem cromatográfica e acesso ótico.
- Os vasos de pressão que irão conter as misturas de teste serão então dimensionados dependendo dos valores de pressão e temperatura máxima de testes e número de testes por tipo de combustível a ser analisado experimentalmente.
- O sistema de aquisição de pressão já está dimensionado e orçado. É um dos subsistemas mais importantes para a operação da máquina de compressão rápida. Este subsistema envolve sensores de pressão piezoelétricos e resistivos para medição de pressão dinâmica (na câmara de compressão ao longo do experimento) e estática (nos vasos de pressão e câmara de testes na preparação do experimento). Os recursos solicitados nesta chamada são destinados em um $\sim 75\%$ para compra deste subsistema.
- O sistema de controle e medição de temperatura (da câmara de compressão, antes do teste e dos vasos de pressão) da máquina de compressão rápida também já está dimensionado e orçado. Os recursos solicitados nesta chamada são destinados em um $\sim 10\%$ para compra deste subsistema.
- O mecanismo de compressão a ser utilizado será definido em função da melhor resposta em termos de “menor” tempo de compressão da mistura. Dois mecanismos serão simulados: (i) compressão mecânica no formato tradicional em motores alternativos, e (ii) compressão pneumática, via movimentação do pistão por ação da pressão na face oposta à face em contato com os gases de teste.
- A máquina de compressão rápida terá o acesso ótico projetado e dimensionado, porém, não está incluído nesta proposta a operação da bancada com a instrumentação de acesso ótico (custos elevados e não disponíveis no momento)
- A máquina de compressão rápida terá o acesso para amostragem cromatográfica. O [Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos - LABCET/CTC/UFSC Florianópolis](#) e o [Laboratório de Combustão e Catálise Aplicadas - LAC/CTJ/UFSC Joinville](#) possuem sistemas de cromatografia disponíveis para serem utilizados na operação da máquina de compressão rápida. Os recursos solicitados nesta chamada são destinados em um $\sim 5\%$ para compra de conexões e acoplamento ao sistema de cromatografia.

A Figura 8 mostra de forma ilustrativa os componentes básicos da bancada de máquina de compressão rápida proposta em este projeto de pesquisa

7.1.2 Construção / fabricação de componentes da máquina de compressão rápida

A construção da máquina de compressão rápida será realizada em empresas especializadas em fundição e manufatura de peças e equipamentos da indústria local (Joinville, SC). Após o projeto e dimensionamento, os desenhos técnicos serão repassados para as indústrias parceiras e todos os diferentes componentes, incluindo os vasos de pressão, câmara de compressão, mecanismo de compressão, suporte estrutural e acoplamentos serão fabricados e usinados com a colaboração de seis indústrias parceiras desta proposta:

- [Tupytec - ANGRA Tecnologia em Materiais](#)
- [Schulz Automotiva](#)
- [Wetzel S.A - Componentes Automotivos em Ferro](#)
- [ArcelorMittal Vega](#)
- [MAGNA MOLDES - USINAGEM](#)
- [METALAB - Engenharia de Materiais](#)

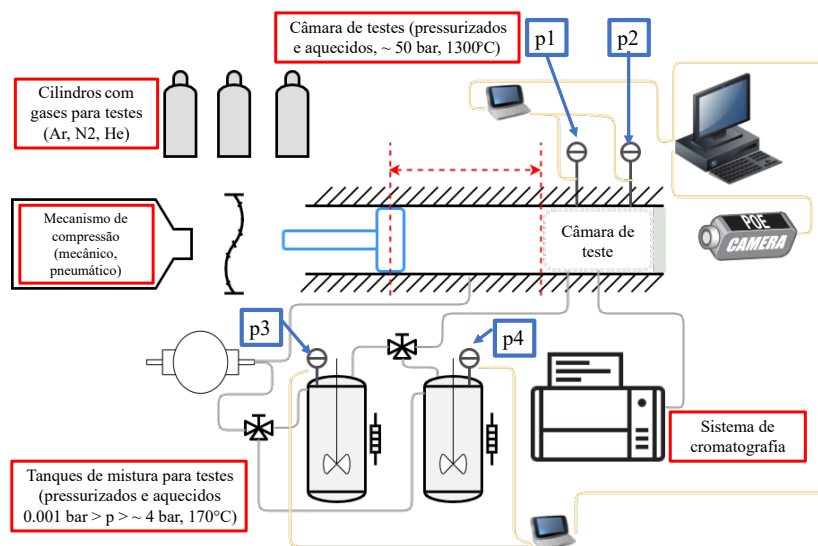


Figura 8: Imagem ilustrativa da bancada de máquina de compressão rápida a ser construída nesta proposta de pesquisa

7.1.3 Montagem da máquina de compressão rápida

Uma vez fabricadas as peças, a máquina de compressão rápida será montada nas instalações do **Laboratório de Motores de Combustão Interna - LABMCI/CTJ/UFSC Joinville**. O LABMCI possui o credenciamento nº 0921/2019 (Despacho Nº 1.025, de 29 de Novembro de 2019) perante à AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. A máquina será montada pela equipe técnica de laboratório e pessoal de apoio da Universidade Federal de Santa Catarina em espaço apropriado e em segurança para a sua operação.

7.1.4 Validação da máquina de compressão rápida

Após a montagem da máquina de compressão rápida, a mesma precisa passar por um processo de validação experimental. Para isto, as instituições colaboradoras desta proposta (**Combustion Chemistry Centre - C3/NUIG** e **Institute for Combustion and Gas Dynamics - Reactive Fluids - IVG/UDE**) irão fornecer dados experimentais de atraso de ignição em tubo de choque e máquina de compressão rápida no intuito de verificar e comparar procedimentos de medição usando combustíveis de referência. Adicionalmente informações da divisão de energia do *Argonne National Laboratory* serão utilizados ao longo deste processo de validação experimental.

7.2 Instrumentação dos motores de 4 cilindros (combustíveis líquidos e gasosos)

Os dois motores serão instrumentados para receber o sensor de pressão dinâmica, como o qual será feita a medição da pressão na câmara de combustão de cada motor. Este processo consiste em “furar” os cabeçotes do motor e usinar o furo com uma rosca adequada para alojar o sensor de pressão. A coleta de dados de pressão na câmara permitirá obter os parâmetros de operação / desempenho dos motores operando com diferentes combustíveis, dados que servem para alimentar simulações de otimização de motores de combustão interna e mecanismos cinéticos de reação. A Figura 9 mostra os dois motores a serem instrumentados para tomada de pressão dinâmica na câmara de combustão. Os processos de furação e usinagem do cabeçote destes motores também serão feitos por empresas parceiras da indústria regional (Joinville, SC)

8 Cronograma

O cronograma de atividades desta proposta estende-se por um período de 36 meses conforme Figura 10

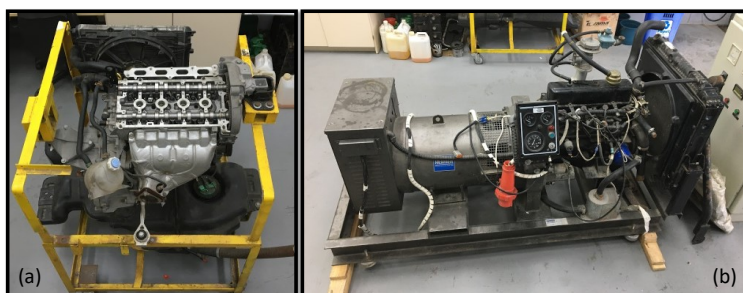


Figura 9: Motores de combustão interna ciclo Otto, disponíveis para instrumentação de pressão em câmara de combustão. (a) Motor 4 cilindros, taxa de compressão alta, combustíveis líquidos. (b) Motor 4 cilindros, combustíveis gasosos

Figura 10: Cronograma de atividades

Implantação de infraestrutura de pesquisa em formulação e desenvolvimento de combustíveis para a indústria do transporte na Universidade Federal de Santa Catarina																																									
Atividade	Primeiro ano												Segundo ano												Terceiro ano																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36					
Revisão bibliográfica	Revisão bibliográfica permanente ao longo do projeto de pesquisa																																								
Projeto, dimensionamento, fabricação, montagem e validação da RCM																																									
Definição da faixa de razões de compressão a ser utilizada nos testes	x	x																																							
Definição de geometrias preliminares para análises em CRFD		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																														
Simulações com as geometrias mais promissoras em termos de baixa influência da camada limite térmica					x	x	x	x	x	x	x	x																													
Projeto e fabricação dos vasos de pressão													x	x	x	x	x																								
Projeto do sistema de aquisição de pressão	x	x	x																																						
Projeto do sistema de controle de temperatura	x	x	x																																						
Projeto do mecanismo de compressão a ser utilizado (mecânico / pneumático)										x	x	x	x																												
Construção / fabricação de componentes da máquina de compressão rápida												x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																	
Montagem da máquina de compressão rápida																																									
Validação da máquina de compressão rápida (Experimentos de atraso de ignição)																																									
Instrumentação dos motores de 4 cilindros (combustíveis líquidos e gasosos)																																									
Motor combustíveis líquidos														x	x	x																									
Motor combustíveis gasosos																																									
Testes de medição de pressão dinâmica nos dois motores																																									
Publicações - Relatórios																																									
Publicação em jornal internacional																																									
Publicação em congresso nacional / internacional																																									
Relatórios para o CNPq																																									

9 Relevância e impacto do projeto para o desenvolvimento científico e tecnológico

O conhecimento e controle dos processos de combustão em motores de combustão interna é aquilo que tem dado maior desenvolvimento científico e tecnológico na indústria do transporte. Ao longo dos quase 200 anos de desenvolvimento do motor e até os dias de hoje, os países que têm e desenvolvem sistemas de combustão cada dia mais otimizados são justamente aqueles mais desenvolvidos a nível tecnológico e industrial, países como Estados Unidos, Alemanha, Inglaterra, etc., destacam-se principalmente pelo seu desenvolvimento e capacidade de exportação de tecnologia para os chamados países do terceiro mundo. O Brasil é o maior produtor de etanol do mundo, mais infelizmente, todas as tecnologias de queima de etanol (muitas ainda não exploradas nem conhecidas, não existe motor de ignição por compressão a etanol) em motores de combustão interna não são desenvolvidas aqui, aliás, nem motores de combustão interna são desenvolvidos aqui no Brasil, todas as tecnologias são importadas de países tradicionalmente conhecidos como desenvolvidos.

Outro propósito e justificativa de esta pesquisa é dar os primeiros passos para que o Brasil “entre” nesse grupo de países desenvolvedores de tecnologias e sistemas de combustão, aplicados a processos complexos como são os motores de combustão interna, parece ambicioso, mais o Brasil tem que começar a dar os primeiros

passos nessa direção, se não o Brasil continuará, como muitos outros países, importando tecnologias que podem e devem ser desenvolvidas aqui, estamos formando uma massa crítica de pesquisadores para fazer isto. A Rede Nacional de Combustão do Brasil, da qual o proponente e vários membros da equipe executora fazem parte, está realizando um trabalho excelente nesta direção, e apoio a este tipo de solicitações de recursos são de grande ajuda em todo este processo. Como escrito anteriormente, no Brasil é bem restrita a pesquisa em combustão desde o ponto de vista experimental. Pesquisas envolvendo testes experimentais em tubo de choque e máquina de compressão rápida, motor CFR, motor com acesso ótico, terão um impacto forte na promoção do ensino na nossa instituição e conseqüentemente no Brasil.

O projeto, dimensionamento e construção da máquina de compressão rápida assim como a instrumentação dos dois outros motores (já disponíveis no LABMCI/UFSC) são processos que envolverão várias áreas da engenharia ao longo da execução, teses de doutorado, dissertações de mestrado e trabalhos de conclusão de curso serão realizados como produto desta proposta de pesquisa. Os dados experimentais obtidos, assim como os procedimentos de operação serão discutidos em sala de aula, gerando possibilidades de promoção do ensino, pesquisa e desenvolvimento tecnológico da combustão de biocombustíveis aplicada a motores de combustão interna. Além dos alunos já vinculados a esta pesquisa, novos alunos de graduação (trabalhos de conclusão de curso) e de pós-graduação (dissertações de mestrado e teses de doutorado) serão vinculados ao projeto e terão pleno acesso a informação e bases de dados obtida nesta pesquisa. Adicionalmente, os dados experimentais e numéricos obtidos serão publicados em revistas científicas de alto impacto. Como escrito na introdução da proposta, o Brasil precisa começar a desenvolver e gerar a sua própria tecnologia em termos de motores de combustão interna. O Brasil é o maior produtor de etanol do mundo, porém infelizmente não temos uma tecnologia própria para a queima eficiente de etanol em motores de combustão interna.

A partir do momento em que o Brasil comece a produzir a sua própria tecnologia em motores de combustão interna, irá ser gerado desenvolvimento tecnológico o que se reflete no bem-estar social no país, pois o Brasil estaria deixando aos poucos a dependência de importação e compra de tecnologias na área de sistemas de combustão incluindo os motores de combustão interna. Não é um processo a curto prazo, mas é um processo que precisa começar a andar, é justamente este o intuito desta pesquisa.

10 Informações complementares do projeto de pesquisa

Esta proposta de projeto de pesquisa faz parte complementar de um projeto “macro” de pesquisa que está devidamente cadastrado e aprovado no Sistema Integrado de Gerenciamento de Projetos de Pesquisa e de Extensão, SIGPEX, da Universidade Federal de Santa Catarina, sob o título “Formulação e desenvolvimento de modelos cinéticos para substitutos de combustíveis - Segunda Etapa” com data de início em junho de 2021.

10.1 Histórico de cooperação internacional

10.1.1 Cooperação UFSC - C3/NUIG

Começou no ano de 2005, com troca de informações entre o proponente (Leonel R Cancino) e os professores John Simmie e Henry Curran. Em 2008 foi feita uma primeira visita ao C3-NUIG, na qual foram tratados temas de cinética química detalhada de etanol e substitutos de gasolina. Posteriormente no ano 2011 o proponente fez pós-doutorado nesta instituição, no qual foram realizados experimentos em tubo de choque e máquina de compressão rápida.

No ano 2016 um aluno de doutorado da UFSC sob a co-orientação do proponente (hoje em dia, Prof. Amir R. De Toni Jr, Dr.Eng / UFRGS - Membro da equipe executora desta proposta) fez doutorado sanduiche sob orientação do Prof. Henry Curran. No período de doutorado sanduiche do aluno, foram realizados testes de ignição térmica em tubo de choque e máquina de compressão rápida de misturas de hidrocarbonetos substitutos de combustíveis de aviação (De Toni *et al.* , 2017).

No mês de junho de 2018 foram realizados 50 experimentos de ignição térmica em tubo de choque de alta pressão, e mais 50 testes em máquina de compressão rápida foram realizados em setembro/2021 (dados ainda não publicados). A Figura 11 mostra alguns registros fotográficos da visita realizada em Junho de 2018 ao C3/NUIG



Figura 11: Registros fotográficos da visita no C3/NUIG, junho de 2018. Tubo de choque de alta pressão, máquina de compressão rápida, componentes periféricos e diafragma usados em experimentos de atraso de ignição

10.1.2 Cooperação UFSC - IVG/UDE

Começou no ano de 2007, com o doutorado sanduiche do proponente. Neste período foi realizada a parte experimental da tese doutoral do proponente (Cancino, 2009). Foram realizados os primeiros testes (reportados na literatura) de ignição de etanol em condições de temperatura e pressões típicas de motores de combustão interna. Simultaneamente foi desenvolvido o primeiro modelo cinético para a oxidação de etanol em condições de motores de combustão interna (Cancino *et al.*, 2010).

Um aluno de graduação em Engenharia Mecânica da UFSC também realizou estágio de pesquisa no IVG/UDE no mesmo ano. Entre 2009 e 2012 o proponente realizou pós-doutorado nesta instituição na área de cinética química de misturas de hidrocarbonetos contendo etanol e pesquisa em cinética química de di-etil-eter (Werler *et al.*, 2015). Foi desenvolvido o primeiro mecanismo cinético detalhado para misturas quinarias / multicomponentes contendo etanol reportado na literatura (Cancino *et al.*, 2011).

No ano 2012 veio ao LABCET/UFSC um dos membros da equipe de cinética química de combustíveis do IVG/UDE (Dr. Mustapha Fikri). No ano 2014 foram realizados testes experimentais complementares para o doutorado do aluno Amir de Toni (De Toni *et al.*, 2017; De Toni, 2017). No mês de fevereiro do ano em curso foram realizados 50 experimentos de atraso de ignição no tubo de choque de alta pressão, a Figura 12 mostra parte do registro fotográfico da visita.



Figura 12: Registros fotográficos da visita no IVG/UDE, Fevereiro de 2018. Fotografias do tubo de choque, componentes e diafragmas usados nos experimentos de atraso de ignição

11 Recursos financeiros disponíveis de outras fontes aprovados para aplicação no projeto

11.1 Recursos financeiros disponíveis - UFSC

A Universidade Federal de Santa Catarina disponibiliza para a execução do projeto os seguintes recursos a nível de contrapartida: (Vide Figura 13 para maiores informações)

- Cluster para simulações (zero dimensionais e CRFD).
- Sistema de cromatografia.
- Combustíveis e gases de teste para validação da máquina de compressão rápida.
- Dois motores de 4 cilindros para instrumentação.

11.2 Recursos financeiros disponíveis - AVL-Advanced Simulation Technologies™

A empresa **AVL-Advanced Simulation Technologies™** disponibilizou duas licenças do programa AVL-BOOS e AVL-FIRE para a execução do projeto, no valor global de R\$ 247,500,00 reais (uso através do University Partner Program). (Vide Figura 13 para maiores informações)

11.3 Recursos financeiros disponíveis - Contribuição das instituições colaboradoras

As instituições colaboradoras desta pesquisa contribuirão com testes experimentais para a validação da máquina de compressão rápida. (Vide Figura 13 para maiores informações)

- **Universidade Nacional de Irlanda, Galway - Combustion Chemistry Centre - C3/NUIG**: Experimentos de referência de atraso de ignição em máquina de compressão rápida para validação (20 experimentos de IDT)
- **Universidade de Duisburg-Essen, Alemanha - Institute for Combustion and Gas Dynamics - Reactive Fluids - IVG/UDE**: Experimentos de referência de atraso de ignição em tubo de choque de alta pressão para validação da máquina de compressão rápida (30 experimentos de IDT)

11.4 Recursos financeiros disponíveis - Contribuição da indústria local (Joinville, SC)

As seis empresas listada a seguir, parceiras desta proposta de pesquisa irão prestar serviços de: (i) Fundição e usinagem de componentes para a máquina de compressão rápida, (ii) Furação usinagem de cabeçotes para a instrumentação dos motores de combustão interna disponíveis na UFSC, (iii) Fabricação dos vasos de pressão para a máquina de compressão rápida. (Vide Figura 13 para maiores informações)

- **Tupytec - ANGRA Tecnologia em Materiais**
- **Schulz Automotiva**
- **Wetzel S.A - Componentes Automotivos em Ferro**
- **ArcelorMittal Vega**
- **MAGNA MOLDES - USINAGEM**
- **METALAB - Engenharia de Materiais**

12 Recursos necessários solicitados ao CNPq nesta proposta

Nesta proposta de pesquisa são solicitados recursos para os seguintes itens:

- Sistema de aquisição de pressão incluindo sensores de pressão dinâmica e estática para as três bancadas.
- Componentes para o sistema de controle e medição de temperatura para a máquina de compressão rápida.
- Componentes para o acoplamento da máquina de compressão rápida ao sistema de cromatografia disponível na UFSC.
- Duas bolsas de Iniciação científica pelo período de execução do projeto.

A Figura 13 mostra a distribuição de itens e valores assim como a sua classificação (Capital, Custeio ou Bolsas), de todas as partes envolvidas na execução desta proposta. Note que, os sensores de pressão dinâmica e estática, mesmo com um valor consideravelmente alto estão classificados como itens de custeio.

Figura 13: Orçamento solicitado ao CNPq nesta proposta de pesquisa

Descrição	Item	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)
Sensor de pressão estática	Custeio	3	7,900.0	23,700.0
Sensor de pressão dinâmica	Custeio	1	56,500.0	56,500.0
Componentes para acoplamento ao sistema de cromatografia	Custeio	---	---	10,000.0
Componentes para sistema de medição de temperatura	Custeio	---	---	40,000.0
Total Itens Custeio				130,200.0
Sistema de aquisição de dados de pressão	Capital	1		116,000.0
Total Itens Capital				116,000.0
Bolsas de IC	Bolsas	2	14,400.0	28,800.0
Total Itens Bolsas				28,800.0
Total solicitado ao CNPq				275,000.0
Cluster para simulações	Capital	1	45,000.0	45,000.0
Sistema de cromatografia	Capital	1	175,000.0	175,000.0
Dois motores de 4 cilindros para instrumentação	Capital	2	12,500.0	25,000.0
Total Itens Capital				245,000.0
Combustíveis e gases de teste para validação	Custeio	---	---	25,000.0
Total Itens Custeio				25,000.0
Total - Recursos financeiros disponíveis - UFSC				270,000.0
Programas para simulação numérica	Custeio	1	247,500.0	247,500.0
Total Itens Custeio				247,500.0
Total - Recursos financeiros disponíveis - AVL-AST				247,500.0
C3/NUIG Testes de ignição térmica para validação	Custeio	30	4,800.0	144,000.0
IVG/UDE Testes de ignição térmica para validação	Custeio	20	7,200.0	144,000.0
Total Itens Custeio				288,000.0
Total - Recursos financeiros disponíveis - Instituições colaboradoras				288,000.0
Fundição e usinagem de componentes	Custeio	---	150,000.0	150,000.0
Furação usinagem de cabeçotes (motores)	Custeio	---	35,000.0	35,000.0
Fabricação dos vasos de pressão para a RCM	Custeio	---	75,000.0	75,000.0
Total Itens Custeio				260,000.0
Total - Recursos financeiros disponíveis - Indústria local (Joinville, SC)				260,000.0
Valor total para execução do projeto de pesquisa				1,340,500.0

Referências

- Baumgarten, Carsten. (2006). *Mixture formation in internal combustion engine*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Brunetti, Franco. (2012). *Motores de combustão interna: volume 1*. 3rd edn. São Paulo: Blucher.

-
- Cancino, L. R., Fikri, M., Oliveira, A. A. M., & Schulz, C. (2010). Measurement and Chemical Kinetics Modeling of Shock-Induced Ignition of Ethanol-Air Mixtures. *Energy & fuels*, **24**(5), 2830–2840. Publisher: American Chemical Society.
- Cancino, L. R., Fikri, M., Oliveira, A. A. M., & Schulz, C. (2011). Ignition delay times of ethanol-containing multi-component gasoline surrogates: Shock-tube experiments and detailed modeling. *Fuel*, **90**(3), 1238–1244.
- Cancino, L. R., Silva, A. da, Toni, A. R. De, Fikri, M., Oliveira, A. A. M., Schulz, C., & Curran, H. J. (2020). A six-compound, high performance gasoline surrogate for internal combustion engines: Experimental and numerical study of autoignition using high-pressure shock tubes. *Fuel*, **261**, 116439.
- Cancino, L.R. (2009). *Development and Application of Detailed Chemical Kinetics Mechanisms for Ethanol and Ethanol Containing Hydrocarbon Fuels*. Ph.D. thesis, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis.
- CETESB. (2019). *Emissão veicular*. <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/>.
- da Silva Jr., A., Hauber, J., Cancino, L. R., & Huber, K. (2019). The research octane numbers of ethanol - containing gasoline surrogates. *Fuel*, **243**, 306–313.
- de Azevedo, Dayana Siqueira, & Braga, Carlos Valois Maciel. (2014). *Estudo experimental da combustão do etanol aditivado na máquina de compressão rápida*. https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2014/relatorios_pdf/ctc/MEC/MEC-Dayana%20Siqueira%20de%20Azevedo.pdf.
- De Toni, A. R., Werler, M., Hartmann, R. M., Cancino, L. R., Schiebl, R., Fikri, M., Schulz, C., Oliveira, A. A. M., Oliveira, E. J., & Rocha, M. I. (2017). Ignition delay times of Jet A-1 fuel: Measurements in a high-pressure shock tube and a rapid compression machine. *Proceedings of the combustion institute*, **36**(3), 3695–3703.
- De Toni, A.R. (2017). *Experimental and Chemical Kinetics Modeling Investigation of Autoignition of Jet Fuel and Surrogates*. Ph.D. thesis, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis.
- Duan, Xiongbo, Lai, Ming-Chia, Jansons, Marcis, Guo, Genmiao, & Liu, Jingping. (2021). A review of controlling strategies of the ignition timing and combustion phase in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine. *Fuel*, **285**, 119142.
- El Shenawy, E. A., Elkelawy, Medhat, Bastawissi, Hagar Alm-Eldin, Panchal, Hitesh, & Shams, Mahmoud M. (2019). Comparative study of the combustion, performance, and emission characteristics of a direct injection diesel engine with a partially premixed lean charge compression ignition diesel engines. *Fuel*, **249**, 277–285.
- Fatouraie, Mohammad, Karwat, Darshan M. A., & Wooldridge, Margaret S. (2016). A numerical study of the effects of primary reference fuel chemical kinetics on ignition and heat release under homogeneous reciprocating engine conditions. *Combustion and flame*, **163**, 79–89.
- Fikri, M., Cancino, L. R., Hartmann, M., & Schulz, C. (2013). High-pressure shock-tube investigation of the impact of 3-pentanone on the ignition properties of primary reference fuels. *Proceedings of the combustion institute*, **34**(1), 393–400.
- Heywood, John B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals*. 2d edn. United States: McGraw Hill Education.
- Kalghatgi, G T, & Head, R A. (2006). Combustion Limits and Efficiency in a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine. *International journal of engine research*, **7**(3), 215–236. Publisher: SAGE Publications.
- Karwat, Darshan M.A., Wagon, Scott W., Teini, Paul D., & Wooldridge, Margaret S. (2011). On the Chemical Kinetics of n-Butanol: Ignition and Speciation Studies. *The journal of physical chemistry a*, **115**(19), 4909–4921. Publisher: American Chemical Society.
- Kozarac, Darko, Vuilleumier, David, Saxena, Samveg, & Dibble, Robert W. (2014). Analysis of benefits of using internal exhaust gas recirculation in biogas-fueled HCCI engines. *Energy conversion and management*, **87**, 1186–1194.
- Kozarac, Darko, Taritas, Ivan, Vuilleumier, David, Saxena, Samveg, & Dibble, Robert W. (2016). Experimental and numerical analysis of the performance and exhaust gas emissions of a biogas/n-heptane fueled HCCI engine. *Energy*, **115**, 180–193.
- Maurya, Rakesh Kumar, & Agarwal, Avinash Kumar. (2014). Experimental investigations of performance, combustion and emission characteristics of ethanol and methanol fueled HCCI engine. *Fuel processing technology*, **126**, 30–48.

-
- Merker, Günter P., Schwarz, Christian, & Teichmann, Rüdiger. (2012). *Combustion engines development: Mixture formation, combustion, emissions and simulation*. Berlin: Springer.
- Mittal, Gaurav. (2006). *A rapid compression machine - design, characterization, and autoignition investigations*. Ph.D. thesis, Case Western Reserve University, Ohio.
- Natarajan, S., kumar, M. Akshay, & Sundareswaran, A. U. Meenakshi. (2017). Computational Analysis of an Early Direct Injected HCCI Engine Using Bio Ethanol and Diesel Blends as Fuel. *Energy procedia*, **105**, 350–357.
- NDMais. (2021). *Empresa joinvilense fecha parceria estrangeira para produzir motor a hidrogênio*. https://ndmais.com.br/tecnologia/empresa-joinvilense-fecha-parceria-estrangeira-para-produzir-motor-a-hidrogenio/?utm_source=whatsapp&utm_medium=social&utm_campaign=ndmais_share.
- Polat, Seyfi. (2016). An experimental study on combustion, engine performance and exhaust emissions in a HCCI engine fuelled with diethyl ether - ethanol fuel blends. *Fuel processing technology*, **143**, 140–150.
- Saad, Michel A. (2020). *Compressible Fluid Flow*. 2nd edition edn. Englewood Cliffs, N.J: Pearson.
- Santana, C.M. (2013). *Caracterização e testes de tubo de choque para análise de combustão com injeção de combustível - dissertação de mestrado - ufmg*.
- Saxena, Samveg, & Bedoya, Iván D. (2013). Fundamental phenomena affecting low temperature combustion and HCCI engines, high load limits and strategies for extending these limits. *Progress in energy and combustion science*, **39**(5), 457–488.
- Soloiu, Valentin, Moncada, Jose D., Gaubert, Remi, Muiños, Martin, Harp, Spencer, Ilie, Marcel, Zdanowicz, Andrew, & Molina, Gustavo. (2018). LTC (low-temperature combustion) analysis of PCCI (premixed charge compression ignition) with n-butanol and cotton seed biodiesel versus combustion and emissions characteristics of their binary mixtures. *Renewable energy*, **123**, 323–333.
- Stoklosa, Alexander. (2017). *Mazda gasoline skyactiv-x spcci engine explained*. <https://www.caranddriver.com/news/a15339942/mazdas-gasoline-skyactiv-x-spcci-engine-explained/>.
- Werler, M., Cancino, L. R., Schiessl, R., Maas, U., Schulz, C., & Fikri, M. (2015). Ignition delay times of diethyl ether measured in a high-pressure shock tube and a rapid compression machine. *Proceedings of the combustion institute*, **35**(1), 259–266.
- Zel'dovich, Ya B., Zel'dovich, Ia B., & Raizer, Yu P. (2002). *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena*. Mineola, N.Y: Dover Publications.