

Programa: Rota 2030 - FUNDEP - Chamada PD&I 01.03/2021
Eixo I – BIO: Bioenergia eficiente aplicada ao setor dos transportes
FAIXA A - Até R\$ 1.000.000,00

Desenvolvimento de motor automotivo movido a biohidrogênio para o mercado brasileiro

Coordenador geral: Prof. Dra. Nina Paula Gonçalves Salau
Coordenador associado: Prof. Dr. Thompson Diórdinis Metzka Lanzasova

Instituição proponente: Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Apoio econômico: Marelli Sistemas Automotivos Industria e Comercio Brasil LTDA e e TCA/HORIBA Sistemas de Testes Automotivos LTDA.

Linhas temáticas: b) Aplicações de biocombustíveis (etanol, biogás, biometano, HVO [diesel verde], biohidrogênio, biodiesel, farnesano, dentre outros) e combustíveis alternativos avançados (óleo pirolítico, gás de síntese, dentre outros) estritamente focados na melhoria de desempenho em motores aplicados à propulsão veicular, incluindo desenvolvimento do sistema propulsor, acessórios e estratégias de operação e controle. **d)** Desenvolvimento de processos, sistemas e/ou dispositivos para a habilitação do uso de biocombustíveis e combustíveis alternativos em sistemas de propulsão veicular elétrica e/ou híbrida, incluindo processo de reforma e/ou célula a combustível. **f)** Desenvolvimento de equipamentos, softwares, algoritmos e mecanismos para melhoria do processo de combustão de biocombustíveis automotivos (leves, pesados, agrícolas), incluindo aquisição de dados, simulação e calibração de mapas de motores.

b) Resumo expandido:

O hidrogênio, quando produzido a partir de fontes renováveis, tem sido reconhecido como uma alternativa excelente para descarbonização do setor de transportes. Com efeito, o uso automotivo de biohidrogênio em motores de combustão interna constitui-se como a solução **mais rápida, mais fácil** e, potencialmente, **mais barata** para atacar, ao mesmo tempo, a **poluição** nos grandes centros e a **emissão de gases de efeito estufa**. Seu emprego apresenta o potencial de *retrofitting* a diversas classes de motores e veículos, aproveitando o parque instalado de veículos e motores. O hidrogênio, no entanto, é altamente reativo e seu uso em motores de ignição por centelha resulta frequentemente em problemas de *knock* (detonação) e *backfire*, ambos danosos ao motor e seus componentes. Além disso, a ocorrência de detonação impõe limites à eficiência térmica, devendo ser mitigada com estratégias e tecnologias adequadas como injeção de água, EGR resfriada, controle térmico ativo, entre outros. Estas tecnologias também podem ser empregadas para controle de emissões de NOx, que podem ser um problema com hidrogênio pois sua temperatura de chama adiabática, apesar não ser a maior entre os combustíveis mais comuns, em conjunto com elevada velocidade de chama, gera temperaturas altas na câmara de combustão, potencialmente elevando emissões de NOx em plena carga. Este projeto visa, portanto, o desenvolvimento de um demonstrador de tecnologia de motor para aplicação veicular, de alta eficiência, movido a biohidrogênio. Serão avaliadas as melhores soluções tecnológicas para aplicação automotiva através da investigação do desempenho do processo de combustão e da geração de emissões de NOx. Serão identificados os desafios da aplicação em motores automotivos atuais e propostas soluções de compromisso e que norteiem novos desenvolvimentos para o mercado nacional, muito sensível ao custo e com suas especificidades. A performance do uso de biohidrogênio será avaliada em um processo de desenvolvimento integrado de simulação e experimentação. Resultados a serem obtidos em motor monocilíndrico de pesquisas serão implementados em um motor multicilindros automotivo, no qual dados experimentais de desempenho e emissões serão também adquiridos, de forma a validar um modelo computacional 1D. Este modelo será utilizado para uma simulação de ciclo padrão de condução, em um veículo representativo, com a qual será avaliada a autonomia, consumo, emissões de NOx, bem como benefícios e desafios de seu emprego. Ao final, obter-se-há um conjunto de dados de calibração e operação em motor monocilíndrico termodinâmico e em motor multicilindros automotivo, com modelos computacionais validados, e ensaios paramétricos otimizados mostrando o roadmap tecnológico tanto para o retrofitting de motores existentes, quanto para a projeto e calibração

de novos motores a biohidrogênio, para o mercado automotivo nacional. O projeto atende à **linha temática (b)** Aplicações de biocombustíveis, uma vez que trata do uso de biohidrogênio com vias de produzir um motor de alta eficiência, bem como à **linha temática (f)** através do “desenvolvimento de mecanismos para melhoria do processo de combustão de biocombustível automotivo, incluindo aquisição de dados, simulação e calibração de mapas de motores. Não obstante, ainda atende à **linha temática (d)** ao proporcionar o desenvolvimento de tecnologia que habilitaria o uso de biocombustível (biohidrogênio) em veículos híbridos. A equipe **multidisciplinar** do projeto, com pesquisadores das engenharias química e mecânica, possui ampla experiência em trabalhos conjuntos e diversas publicações em pesquisa e desenvolvimento de biocombustíveis e sua aplicação otimizada em motores de combustão. O grupo de pesquisa em motores, combustíveis e emissões (GPMOT) realizará os ensaios de performance e emissões em motor monocilíndrico e multicilindros a H₂, enquanto que atuará junto com os pesquisadores do Laboratório de Engenharia de Processos Assistida por Computador (LEPAC) desenvolvendo projetos de experimentos e a modelagem termodinâmica CFD 1-D e 3-D para acompanhamento e aprimoramento dos ensaios de motor, culminando com o mapeamento da operação do motor multicilindros com o uso de redes neurais artificiais. O grupo também conta com laboratórios do curso de engenharia química no que tange à análise físico-química de biocombustíveis e ao desenvolvimento de softwares, algoritmos e mecanismos para melhoria do processo de combustão de biocombustíveis automotivos, dispondo de professores e técnicos aptos a apoiar as demandas dos projetos de pesquisa e desenvolvimento. O GPMOT teve diversos projetos com financiamento externo aprovados no passado, incluindo 3 projetos no edital Rota 2030 linha V em 2020, que reforçaram a estrutura do já muito bem montado laboratório de motores, dotado de modernas instalações para P&D que em conjunto com as excelentes instalações da engenharia química, garantem a plena execução dos objetivos desta proposta.

c) Objetivo da proposta:

Objetivo geral: Desenvolver um motor automotivo a biohidrogênio, e de alta eficiência, zero emissões de carbono e baixas emissões de NO_x.

Objetivos específicos:

1. Realizar ensaios preliminares um motor monocilíndrico de pesquisas;

2. Construir um modelo computacional em GT-Power completo, validado, confiável, do motor monocilíndrico de pesquisas utilizando hidrogênio, consolidando um processo de desenvolvimento integrado de simulação e experimentação.
3. Configurar e validar modelos preditivos de *knock* e combustão turbulenta para hidrogênio utilizando software de fluidodinâmica computacional Converge
4. Utilizando DOE, realizar simulações e ensaios paramétricos da operação com biohidrogênio, obtendo dados para otimização que leve a melhorias no processo de combustão e na eficiência de operação.
5. Realizar estudos paramétricos em motor monocilíndrico de pesquisas e analisar a influência de diferentes razões ar-combustível, razões de compressão, atraso de ignição e limitações devido à autoignição com o biohidrogênio, bem como *backfire*.
6. Identificar o potencial do biohidrogênio para operação desestrangulada com diluição por ar, gases queimados (EGR e/ou gases residuais) ou ambos.
7. Realizar ensaios em um motor multicilindros automotivo, aplicando os resultados obtidos com os estudos no motor monocilíndrico e em simulação.
8. Gerar mapas base de calibração com o auxílio de modelos de redes neurais artificiais (ANN) e adquirir dados que sirvam de referência para a indústria nacional
9. Realizar ensaio final do motor multicilindros em dinamômetro de bancada, adquirindo dados de eficiência e emissões;
10. Apresentar os desafios tecnológicos para operação com biohidrogênio em motores atuais.
11. Realizar simulação veicular em ciclo urbano de condução, com os dados obtidos de ensaio em dinamômetro de bancada do motor multicilindros a biohidrogênio
12. Desenvolver recursos humanos especializados: engenheiros, mestres e doutores capacitados para atender às demandas da indústria nacional.
13. Produzir material técnico/bibliográfico para disseminação do conhecimento
14. Aumentar a cooperação internacional com a equipe de parceiros.
15. Aumentar a visibilidade do grupo de pesquisas perante a indústria nacional
16. Demonstrar o potencial do biohidrogênio como solução nacional

d) Justificativa e relevância:

Problema a ser resolvido: Viabilizar tecnicamente a aplicação de biohidrogênio em motores automotivos nacionais. Embora demonstre alto potencial para uso como combustível

em motores de combustão interna (MCI), o hidrogênio é altamente reativo e seu uso em motores de ignição por centelha resulta em três principais problemas: 1) frequente ocorrência de *knock* com o aumento de temperatura da câmara e disponibilidade de oxigênio para reação; 2) em motores com tecnologia de injeção no pósito (PFI), que são a maioria no país, incidência do chamado *backfire*, quando parte do combustível injetado no pósito reage com o oxigênio do ar e sofre autoignição, com possíveis danos ao sistema de admissão; 3) emissões de NOx: devido à alta velocidade de chama e temperatura de combustão com hidrogênio, ocorre a formação de emissões de óxidos de nitrogênio. Logo, soluções tecnológicas devem ser criadas para mitigar a ocorrência de *knock* e *backfire*, bem como no controle de emissões de NOx na aplicação de H₂ como combustível.

A utilização de biohidrogênio (hidrogênio produzido de fontes renováveis) é, provavelmente, a melhor solução de curto prazo para mitigar emissões de gases de efeito estufa, bem como para eliminar emissões de poluentes locais, como CO, hidrocarbonetos não queimados e aldeídos, restando apenas NOx. As emissões de NOx podem ser reduzidas ou controladas pelo uso da diluição, especialmente com EGR resfriada, porém também com combustão suficientemente pobre. Ambas as tecnologias reduzem a potência máxima em plena carga, porém promovem redução de trabalho de bombeamento em carga parcial. Alternativamente, a injeção de água aparece como uma solução para NOx em carga alta, ao mesmo tempo que oferece um método efetivo para controle de detonação, contribuindo para o aumento da eficiência do motor.

A combustão de hidrogênio em motores (MCI-H₂) é uma solução nascente, mas pode preencher um nicho importante aproveitando tecnologias e cadeias de abastecimento estabelecidas. Entre as outras mais comuns tecnologias de emissão de carbono zero (biocombustíveis em geral, célula combustível e veículo elétrico a bateria), a combustão de hidrogênio ainda está em sua infância, apesar de uma história (irregular) que remonta ao motor de 1806 de Rivaz [1], que funcionava com uma mistura de hidrogênio-oxigênio. Por muito tempo, os motores de combustão a hidrogênio foram desconsiderados, pois os custos altíssimos do hidrogênio tornavam o trem de força antieconômico. Hoje, no entanto, alguns OEMs automotivos, fornecedores de componentes e start-ups estão reconsiderando a combustão de biohidrogênio como um componente adicional de seus futuros portfólios de trem de força, junto com baterias e células de combustível.

Apesar dos desenvolvimentos impressionantes, as baterias e a tecnologia de células de combustível ainda não estão prontas para atender a determinados requisitos de alta potência por longos períodos, baixo tempo de recarga, baixo custo de instalação (CAPEX), entre outros

problemas. Os motores de combustão interna atendem a esses requisitos há décadas, e uma mudança de combustíveis fósseis para o hidrogênio pode ser uma maneira direta de descarbonizar esses motores, com uma exigência relativamente pequena de novas inovações técnicas. Além dessas considerações, MCI-H2s oferecem outras vantagens para OEMs automotivos e fornecedores de componentes: eles fazem uso do know-how e trabalhos de engenharia atuais, aproveitam as cadeias de suprimentos existentes e as capacidades de produção na indústria automotiva e não criam preocupações de sustentabilidade e integridade em torno do fornecimento e reciclagem de metais preciosos ou terras raras [2]. Além dessas considerações, os MCI-H2s oferecem outras vantagens para OEMs automotivos e fornecedores de componentes: eles fazem uso do know-how e trabalhos de engenharia atuais, aproveitam as cadeias de suprimentos existentes e as capacidades de produção na indústria automotiva e não criam preocupações de sustentabilidade e integridade em torno do fornecimento e reciclagem de metais preciosos ou terras raras, como nas baterias e células a combustível.

Aumento da competitividade: O emprego de biohidrogênio é, possivelmente, a solução **mais rápida, mais fácil** e, potencialmente, **mais barata** para atacar, ao mesmo tempo, a **poluição** nos grandes centros e a **emissão de gases de efeito estufa**. Esse projeto irá oferecer dados demonstrativos da aplicação de biohidrogênio em motores de veículos nacionais, de produção, com o mínimo possível de alterações. Serão apontadas estratégias de calibração e configuração do motor, favorecendo ganhos de eficiência e reduções muito expressivas de emissões de poluentes locais, visando atender a legislações atuais e futuras, aumentando a competitividade dos fabricantes que delas se utilizarem. As alterações nos motores atuais que permitam o uso de hidrogênio configuram, também, **melhorias técnicas**, ampliando o portfólio de aplicações e **incorporando uma nova tecnologia a um produto já existente**. Por fim, serão produzidos dados de suma importância para a indústria se preparar e antecipar as tendências de mercado, com foco nas especificidades nacionais, tendo em vista um ambiente de negócios muito sensível ao custo. Os motores de combustão a biohidrogênio podem aproveitar e aprimorar as tecnologias existentes, além de fornecer uma opção de emissão de carbono zero, ao mesmo tempo que apoiam o crescimento da infraestrutura de distribuição, favorecendo a **criação de um novo mercado** de mobilidade a biohidrogênio.

Além disso, o projeto atende ao **item 7.1.1 do edital** ao apresentar uma solução tecnológica tangível para o problema da poluição urbana e emissões de carbono, em alternativa à

eletrificação pura, auxiliando o setor produtivo a atingir metas ambientais futuras. Ao mesmo tempo, avança estudos anteriores do grupo, em hidrogênio, transformando-o em tecnologia disruptiva ao apresentar protótipo funcional de novo combustível cuja infraestrutura ainda não está criada, o que também abre oportunidades para startups nas áreas de produção de biohidrogênio, de sistemas e estações de distribuição, bem como e também sistemas de conversão veicular para operação com biohidrogênio.

e) Introdução e estado da arte:

A nova realidade de rigorosas legislações ambientais e a preocupação com as mudanças climáticas têm cada vez mais convergido para a busca por fontes de energia limpas e renováveis, capazes de reduzir o impacto econômico e ambiental do uso de combustíveis fósseis. Em 2016, foi assinado o Acordo de Paris [3], cujo principal objetivo é assegurar que o aumento da temperatura média global não ultrapasse 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, preferencialmente, o limite deve ser de 1,5 °C. Entretanto, conforme mais recente relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) [4], o órgão de maior autoridade do mundo em ciência do clima, sem a redução drástica de emissão dióxido de carbono (CO₂) e outros gases do efeito estufa (GEE), os objetivos do Acordo de Paris não serão cumpridos. Pela primeira vez, o relatório do IPCC destacou que além de reduzir a necessidade de controlar as emissões de metano (CH₄), gás invisível e incolor, que teria um poder de aquecimento 80 vezes maior do que o dióxido de carbono (CO₂), no curto prazo. Em *Our World in Data* [5] são descritas as emissões globais de GEE por setor em 2020, O setor energético é responsável por 73,2% das emissões de GEE, sendo que 16,2% provém da queima de combustíveis fósseis no subsetor de transportes. Além do passivo ambiental gerado pela queima de combustíveis fósseis, o contínuo aumento de preço dessas commodities também é um grave problema para o subsetor de transportes. Neste mês, setembro de 2021, o preço do barril de petróleo superou a marca de U\$80,00, o seu maior valor em três anos [6], cujo impacto econômico é sentido principalmente no Brasil em função da crítica desvalorização do real em relação ao dólar. O cenário atual da economia brasileira evidencia ainda mais a necessidade de soluções nacionais para o uso de combustíveis alternativos em mobilidade sustentável.

Biohidrogênio: o hidrogênio, quando produzido a partir de cadeias de abastecimento de baixo carbono, tem sido reconhecido como uma alternativa futura em potencial na substituição de combustíveis fósseis [7]. No Brasil, a proposição de diretrizes para o Programa Nacional do

Hidrogênio (PNH_2) [8] foi apresentada no mês passado (04/08/21) pelo Ministério de Minas e Energia (MME) aos membros do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Em atendimento à Resolução nº 6/2021 do CNPE [9], o estudo contempla políticas públicas, tecnologia e mercado, e foi realizado em cooperação com os Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e do Desenvolvimento Regional (MDR), com apoio técnico da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [10]. Das fontes produtivas de baixo carbono, ganha cada vez mais relevância a produção do chamado hidrogênio “verde”, ou biohidrogênio. Assim, alivia-se a pressão sobre a produção por rotas convencionais (que envolvem fontes fósseis) ao mesmo tempo em que rotas mais amigáveis ao meio ambiente são exploradas, como a obtenção de hidrogênio por meios eletroquímicos através do emprego de energia elétrica limpa (hidrelétricas, energia solar, energia eólica) [11]. Embora muito relevante para a inserção do hidrogênio como um combustível de baixa pegada de carbono, a implementação da produção de biohidrogênio por eletricidade limpa ainda é insipiente, necessitando investimentos em infraestrutura e estudos técnicos e econômicos aprofundados [12]. O biohidrogênio também pode ser obtido por meio de energia térmica, como a termólise da água, ciclos termoquímicos para a separação da água, ciclos híbridos e gaseificação [13]. Avançando ainda mais nos processos mais atuais de produção do hidrogênio verde, o aproveitamento da biomassa com geração e reforma de biogás para produção de hidrogênio também é uma opção, com plantas produtivas que têm a capacidade de produzir ainda eletricidade e calor, aumentando seu perfil de sustentabilidade [14].

Mercado brasileiro para veículos movidos a hidrogênio de fontes limpas: atualmente não existe no Brasil um mercado para o uso de hidrogênio como combustível convencional em um motor de combustão interna. Mudanças de infraestrutura de abastecimento e necessidade de instalação de cilindros no veículo serão desafios naturais [15], [16], mas que, a exemplo do que ocorreu com o gás natural veicular (GNV), tendem a ser resolvidos, levando a aumento da demanda, potencializado pelo apelo ambiental de uso de um combustível de alta eficiência e baixa pegada de carbono, quando obtido através de fontes renováveis. Em estudo sobre a viabilidade do uso de hidrogênio como combustível, ressalta-se a importância no melhoramento dos sistemas de estocagem e também das tecnologias de produção, com o método de eletrólise tendo um custo alto por kg de hidrogênio produzido [17]. Entretanto, o Brasil, com abundância de biomassa e produtos vegetais, possui uma ampla experiência na produção de

biocombustíveis, a exemplo do etanol, e, mais recentemente, do biogás/biometano, que tende a crescer muito e é uma excelente matéria prima para o biohidrogênio.

Rotas para a produção do biohidrogênio: Atualmente, o gás natural é a principal matéria-prima para a produção de hidrogênio em reformadores a vapor de metano nas indústrias de amônia e metanol, e em refinarias. O gás natural é responsável por cerca de três quartos da produção anual global de cerca de 70 milhões de toneladas de hidrogênio (MtH_2), usando cerca de 205 bilhões de metros cúbicos (bcm) de gás natural (6% do uso global) [7]. Entretanto, existem outras rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio, conforme mostrado na Figura 1.

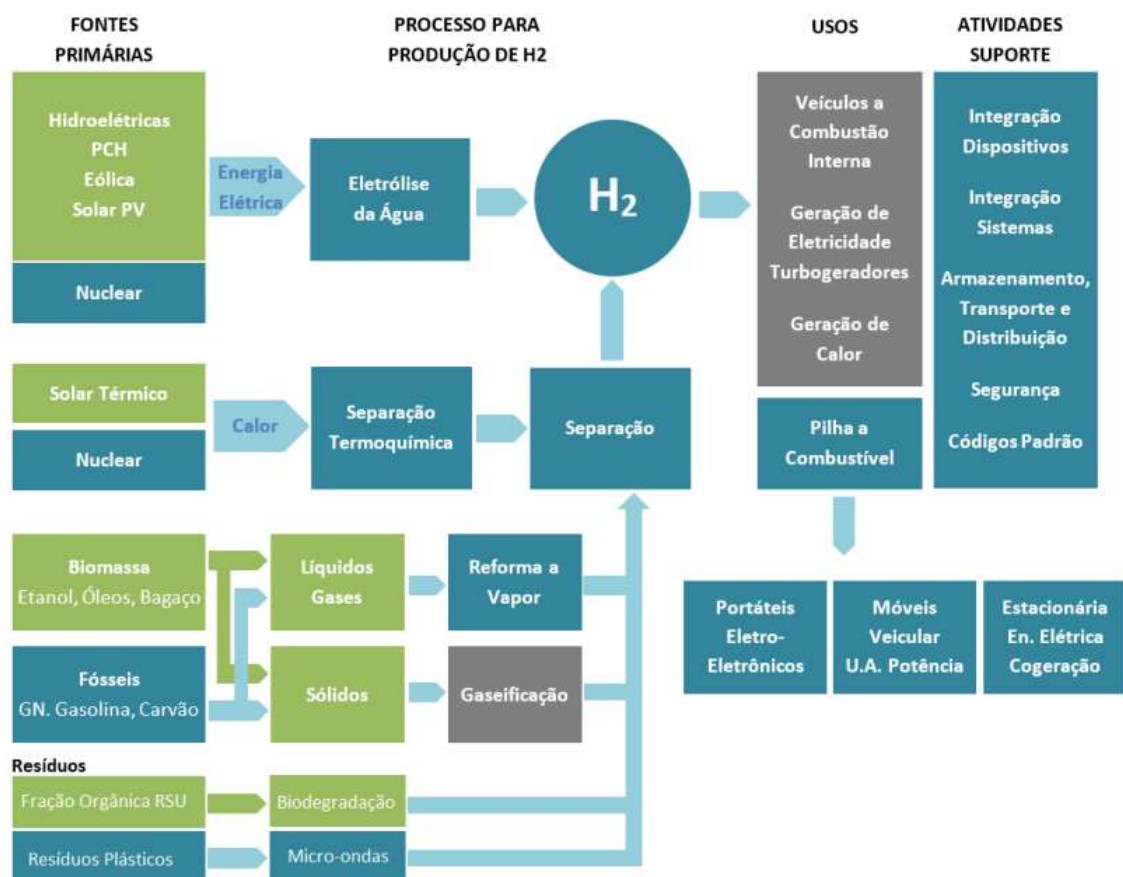


Figura 1 - Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio [10].

Em especial no Brasil, a produção do biohidrogênio pela reforma a vapor do etanol e de outros biocombustíveis (como o biogás) tem grande potencial para ampliar as alternativas de produção de hidrogênio renovável, e algumas alternativas ainda permitirão emissões negativas ao associarem tecnologias de captura, sequestro e uso de carbono (CCUS) [10], [18]. Uma

possibilidade muito atrativa é a produção de biohidrogênio a partir da reforma do metano oriundo do biogás, que atacaria **o problema da emissão veicular de poluentes**, além de suprimir a emissão de carbono através da **produção renovável** de hidrogênio [19]–[23]. O Brasil tem uma produção anual de biogás superior a 85 bilhões de metros cúbicos, porém corresponde a menos de 1,5% do potencial total de produção, especialmente levando-se em conta os mais de 3000 lixões em mais de 1600 cidades que despejam metano diretamente na atmosfera, sem nenhum tipo de captação, em quantidades equivalentes ao que é emitido pelo Vulcão Etna, anualmente [24]–[29]. O novo **Marco Legal do Saneamento Básico** [30] estabelece que até 2024 todos os lixões do país deverão ser convertidos em aterros sanitários, o que abrirá um potencial **gigantesco** para produção de biogás, e, por consequência, biohidrogênio dele produzido.

Motores de combustão interna movidos a hidrogênio:

A aplicação direta do hidrogênio combustível tem sido investigada em diversos tipos de motores de combustão interna: alternativos [31], [32], motores Wankel [33], motores de pistão livre [34], [35], motores de pistão oposto [36], [37]. Devido ao estudo dessa aplicação não ser recente, várias descobertas já foram feitas em relação aos problemas encontrados e também às possíveis soluções. Via de regra, a principal dificuldade ao implementar um sistema de propulsão baseado em hidrogênio é a forma de introdução do combustível no motor [38]. O desenvolvimento de veículos que usam hidrogênio em motores de combustão interna já teve início em grandes montadoras, mas ainda está em período inicial de desenvolvimento. Um exemplo é a Toyota, que está desenvolvendo motores de combustão interna que usam apenas hidrogênio, sem qualquer tipo de emissão no escapamento que não água e NOx [39]. A MAZDA também propõe um desenvolvimento com MCI, mas com uso de hidrogênio em motor rotativo. Neste caso, a montadora afirma que a tecnologia RENESIS tem potencial de suprimir a ocorrência de *backfire*, possibilita o uso combinado de injeção direta e indireta, aumentado o percentual de pré-mistura e permitindo o uso de modo *dual-fuel*, além de usar uma mistura empobrecida e recirculação de gases de exaustão para reduzir emissões de NOx [40]. A Cummins, mais voltada à produção de veículos pesados como ônibus e caminhões, também passou a explorar o uso de hidrogênio como combustível tanto em MCI como em células de combustível. Para tanto, fez parceria com a empresa NPROXX, especialista em desenvolvimento de cilindros com alta pressão, e está produzindo eletrolisadores para obtenção de hidrogênio por fontes limpas [41]. A AVL também anunciou o desenvolvimento de um MCI

alimentado a hidrogênio com aplicação específica para veículos pesados, visando reduzir consideravelmente as emissões de CO₂ desses veículos e seu impacto no efeito estufa [42]. A Tabela 1 mostra as comparações das propriedades do combustível que afetam as características de combustão do motor entre hidrogênio e gasolina, etanol e metano [43]–[47].

Tabela 1: Propriedades dos combustíveis que afetam as características de combustão:

Propriedade	Unidade	Combustível			
		Gasolina	Etanol	Metano	Hidrogênio
Poder calorífico inferior (LHV)	MJ.kg ⁻¹	44,79	26,9	46,72	119,70
Densidade	kg.m ⁻³	720-775	785	0,67	0,08
Coeficiente de difusão no ar	cm ² .s ⁻¹	0,05	0,02	0,189	0,61
Número de octanagem (RON)	-	92-98	107	120	≥ 120
Razão ar/combustível estequiométrica	-	14,6	9,0	17,23	34,3
Velocidade de chama laminar	m.s ⁻¹	0,37-0,43	0,39	0,38	2,65-3,25
Limites inflamáveis no ar	vol %	1,2-6,0	3,3-19	5,3-15,0	4,0-75,0
Energia de ignição mínima	MJ	0,25	0,23	0,28	0,02
Distância de “quenching”	mm	2,0	1,65	2,03	0,64
Temperatura de autoignição	K	500-750	698	813	858
Temperatura de chama adiabática	K	2470	2193	2224	2379

Nos motores de ignição por centelha, a alta velocidade de chama laminar do hidrogênio favorece uma maior eficiência térmica ao aumentar o grau de volume constante do ciclo. A baixa energia

de ignição mínima significa menor taxa de falha de ignição e combustão mais estável, que, juntamente com a ampla faixa de inflamabilidade no ar, facilita a combustão pobre ou diluída por EGR. Por outro lado, a detonação (“*knock*”) ocorre facilmente devido à baixa energia de ignição mínima e à baixa fração de volume de inflamabilidade, especialmente em altas razões de compressão [48]. O controle da detonação pode ser feito com a injeção de água na admissão. A solução de injeção de água pode ser implementada sem grandes modificações de arquitetura em relação às plataformas atuais, utilizando componentes de tecnologias comerciais, como injetores solenóides de alta ou baixa pressão [49], [50]. Além disso, o aumento na capacidade térmica da carga também auxilia na redução da temperatura ao final da compressão. Com isso, a temperatura dos gases não-queimados é reduzida, em relação à combustão sem adição de água, possibilitando que avanços de ignição ótimos possam ser utilizados em regimes de operação em alta carga [51], [52]. Com isso, tem-se aumento de eficiência de operação e possibilidade de aumento de torque em carga máxima [53]. A fim de eliminar a necessidade de realimentação de água do sistema de injeção de combustível e evitar a possível falta, diversos autores estudaram a viabilidade de utilização de água reciclada a partir dos gases de exaustão arrefecidos ao ponto de orvalho [50], [54]–[56]. Tal fato é especialmente relevante no caso de motores a hidrogênio, dada a elevada quantidade de água gerada pela sua combustão, na forma de vapor que, ao condensar, tornar-se-ia fonte para água de injeção. A injeção de água ainda teria o benefício colateral de reduzir a temperatura de combustão e baixar emissões de NO_x. Devido à alta velocidade de chama laminar, baixos limites de queima pobre e baixa energia de ignição mínima, os motores PFI, originalmente projetados para a gasolina, apresentam problemas “*backfire*” quando operando com hidrogênio. Sua alta difusividade molecular, ao mesmo tempo que favorece a homogeneidade da mistura, tende a agravar o problema de backfire. É necessária análise cautelosa de tempos de válvula e razão de compressão efetiva, de forma a minimizar escoamento reverso e período de cruzamento que possam promover contado de mistura ar-hidrogênio com pontos quentes, o que também demanda cautelosa seleção de grau térmico de velas de ignição e a correta seleção do instante de injeção [35, 40, 41]. Cabe salientar que as propriedades do hidrogênio, em particular seus amplos limites de inflamabilidade, tornam-no um combustível ideal para combinar com outros combustíveis, caso necessário, e, assim, melhorar propriedades de combustão em operação “*blended*” (gás natural, metano) e operação “*dual-fuel*” (diesel, biodiesel, gasolina e álcoois combustíveis) [42]. Não obstante a possibilidade do uso em misturas, o maior potencial enquanto combustível “limpo” a utilização do biohidrogênio como único combustível, em motor corretamente configurado. Neste cenário,

é imprescindível que seja desenvolvida uma solução tecnológica nacional, para utilização eficiente do biohidrogênio, preparando o país, tecnologicamente, para o futuro. Este projeto visa o desenvolvimento de um protótipo demonstrador de tecnologia de motor de alta eficiência e baixas emissões de poluentes, movido a biohidrogênio, para aplicação automotiva. O potencial emprego dessa solução em grandes centros urbanos está alinhado com os objetivos dos programas nacionais de controle de emissões e de controle de qualidade do ar [57], [58]. Em consequência, também atende aos critérios de aumento de eficiência energética propostos pelo programa Rota 2030 [59], com o qual este projeto compartilha estrutura e do qual recebe financiamento colateral [60], através dos projetos aprovados por outros colegas do grupo no qual participam os proponentes. Dos três projetos aprovados, dois tem intensa sinergia com este: “Injeção de ultra alta pressão para motores flexfuel: desafios tecnológicos para uso de etanol” e, mais especificamente, o de título “Desenvolvimento de Motor a Biogás de Alta Eficiência para Veículos de Transporte de Carga”, que tem como foco específico o desenvolvimento de um motor a biogás para veículos urbanos de carga. Estes projetos visam atender aos anseios das empresas parceiras dos contratos aprovados: Stellantis, Bosch, AVL, GM, Marelli e CAOA, que têm como objetivo desenvolver tecnologias para aplicação no mercado nacional, de forma a corresponder aos anseios tecnológicos que agreguem qualidade e competitividade a seus produtos e, mais especificamente, atender às metas governamentais de eficiência energética e emissões. Dessa forma, fica inequívoca a relevância desta proposta para o setor da mobilidade, no âmbito do edital Rota 2030. Este projeto levará soluções para melhoria da competitividade na geração e na diversificação da matriz energética pelo uso de biohidrogênio, contribuindo para o aumento da segurança e eficiência energética no setor de transportes, mediante o uso de energias renováveis e contribuindo para a transição para matriz de baixo carbono.

f) Metodologia:

O projeto para desenvolvimento de motor automotivo alimentado com biohidrogênio será financiado com recursos aprovados no presente edital ROTA 2030, Linha V - Eixo I (BIO). De forma a concluir satisfatoriamente os objetivos colocados para o projeto, o resultado esperado consiste na demonstração tecnológica de um motor cuja operação com biohidrogênio ocorra de forma eficiente. Para tanto, etapas de simulação em software CFD-1D/3D, modelos termodinâmicos e modelos de fluidodinâmica serão intercaladas com etapas de experimentação, envolvendo a equipe da UFSM e as empresas parceiras no projeto.

O presente projeto integrará ações de simulação computacional (em software de simulação unidimensional GT-Suite, software de simulação fluidodinâmica Converge e software de implementação de redes neurais artificiais MatLab) e ensaios um motor monocilíndrico de pesquisas Ricardo Proteus (Figura 2), instrumentado e instalado no laboratório de motores da UFSM (na célula de testes nº 2). Nele serão desenvolvidos os experimentos planejados com DOE, parametrizando e variando razão de compressão (através de espaçadores), duração de combustão, COVimep, *knock-index*, ignição do H₂, percentual de ciclos com *back-fire*, pressão máxima e posição angular, potência e eficiência indicada, limites de operação pobre e diluída, emissões, entre outros. Estes dados irão validar os modelos computacionais de detonação, combustão, transferência de calor, emissões, entre outros. com os quais análises serão feitas em coerência com os resultados experimentais. Nas reuniões do projeto, os parceiros industriais (MARELLI, HORIBA) conhecerão os resultados e poderão dar seus feedbacks e inputs, auxiliando no atingimento dos objetivos e metas propostos. Estes dados serão discutidos e compartilhados com o Prof. Karsten Wittek, da Universidade de Heilbronn/Alemanha, parceiro de pesquisas do grupo, que iniciou um projeto de pesquisas com hidrogênio para uso veicular e que fornecerá dados de caracterização de combustão de seus motores. Esta operação será acompanhada em missão de trabalho na sua universidade, oportunidade na qual serão discutidos os resultados e potenciais melhorias. O Prof. Karsten desenvolveu um injetor específico para H₂ que será testado também. O gerenciamento eletrônico do motor será feito com uma ECU programável, capaz de controlar injeção e ignição de forma automática e independente, bem como a operação do motor como um todo, fornecendo dados via CAN para integração aos sistemas de aquisição de dados do dinamômetro. As temperaturas a serem medidas usarão como sensores termopares e termorresistências. A razão ar-combustível será medida com sensores de oxigênio Bosch LSU 4.2. Pressões serão medidas com sensores resistivos e piezoelétricos (pressão de cilindro). A aquisição de dados de operação será feita com software próprio desenvolvido em rotina Labview, enquanto que dados de combustão serão obtidos com Software AVL Indicom. A análise de emissões será feita com um analisador de gases AVL SESAM FTIR i60 SII. Todos os dados, indicados e de eixo, serão adquiridos de forma sincronizada, incluindo dados da ECU, Indicom, FTIR e dinamômetro. Para a implementação do biohidrogênio em um motor automotivo multicilindros, uma célula AVL totalmente automatizada será utilizada inicialmente (célula de testes nº 1), contando com balança de medição de vazão, dinamômetro e sistema de indicação de dados Indicom, além do analisador FTIR (Figura 3), instrumentado e instalado no laboratório de motores da UFSM (na célula de

testes n° 2) (Figura 4). A instrumentação de medição e controle do motor será a mesma apresentada no motor monocilíndrico, apenas com maior quantidade de sensores de pressão e temperatura. O gerenciamento eletrônico do motor também será executado com uma ECU programável. Também há a disponibilidade de um completo laboratório de máquinas-ferramenta para execução das atividades de fabricação necessárias. No último ano de projeto, os ensaios em motor multicilindros continuarão, porém na célula de testes n°3, que receberá um dinamômetro e sistema de potência fornecido pela empresa parceira TCA-HORIBA, que também atuará na viabilização da instalação e assistência, como contrapartidas ao projeto. Este dinamômetro substituirá o que está atualmente nesta célula instalado (Figura 5). Tal se deve para dar mais flexibilidade ao projeto, uma vez que outro projeto necessitará da célula n°1 no 3° ano. A instrumentação e o controle da célula 3 são feitos por software próprio, construído em ambiente Labview e há muito utilizado, em constante evolução, que proporciona controle automático em malha fechada de velocidade, bem como do devido condicionamento de temperaturas de fluidos do motor. O restante da instrumentação será o mesmo, bem como o mesmo analisador de gases AVL será utilizado.

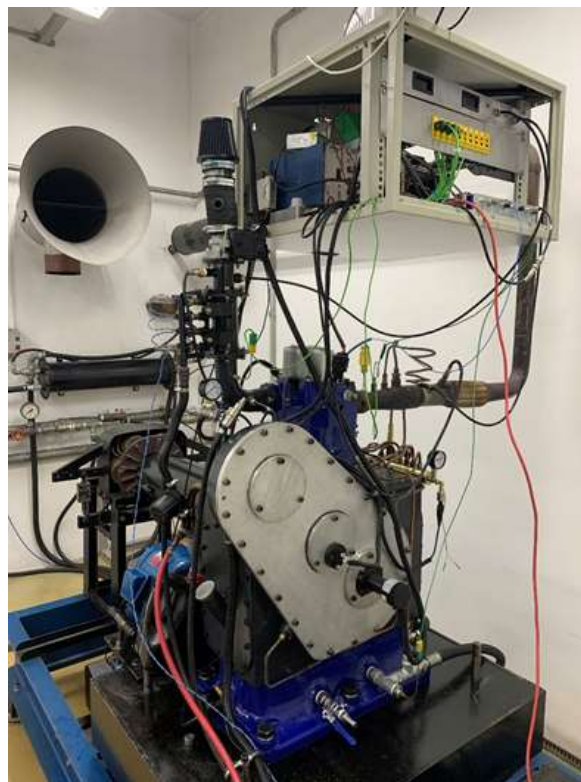


Figura 2: Motor monocilíndrico de pesquisas Ricardo Proteus.



Figura 3: Dinamômetro AVL com analisador de gases FTIR e sistema de indicação Indicom.



Figura 4. Laboratório de motores da UFSM.

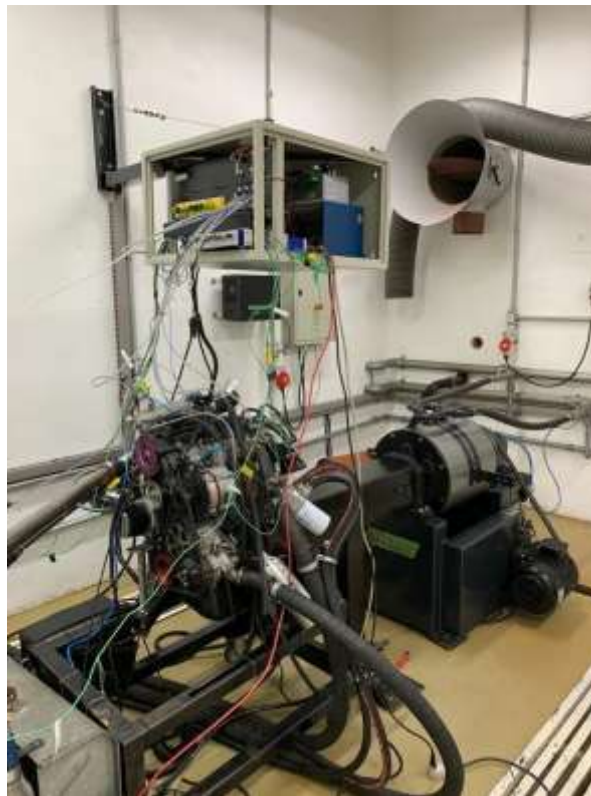


Figura 5: Dinamômetro na célula 3 que será substituído pelo da TCA-Horiba

Observa-se que o projeto conta com uma infraestrutura excelente para garantir a realização do projeto, sendo necessária a aquisição dos seguintes com os recursos do Edital ROTA 2030, Linha V - Eixo I (BIO):

Material de consumo: Como material de consumo constante na planilha orçamentária tem-se a aquisição de recargas de hidrogênio gasoso, que será o combustível para ensaios, além de pequena quantidade de gasolina e etanol, que serão usados em ensaios para solução de problemas e calibração de instrumentação dos motores, antes da alimentação com hidrogênio. Além disso, serão necessários itens como dispositivos eletrônicos para instrumentação (sensores de pressão e temperatura, lambda, atuadores, conectores, leitores, acessórios, entre outros), bem como componentes para manutenção preventiva dos dinamômetros e analisador de gases (incluindo serviços), reposição de peças dos compressores que alimentam o analisador de gases e a célula (compressor seco e geral), cabos específicos para instrumentação, entre outros, além de sensor de pressão piezoelétrico para a câmara de combustão.

Em **material permanente** serão necessários:

1. Computador portátil de alta performance: Equipamento que será utilizado para a aquisição online e em tempo real de dados experimentais para a simulação dos modelos computacionais propostos no projeto.
2. Compressor: Compressor seco necessário para fornecimento de ar para o gerador de ar sintético do analisador de gases. A unidade existente está em final de vida útil e precisa ser reposta.
3. Válvulas reguladoras automáticas de pressão: Válvulas utilizadas para regular a pressão de saída em cilindros de gases ultrapuros de H_2 para a utilização nas linhas desse gás que abastecem as células de teste e o analisador de gases.
4. Medidor de vazão coriolis para gases: Instrumento de alta precisão utilizado na medição da vazão mássica (ou volumétrica), temperatura e densidade do H_2 , combustível gasoso utilizado no projeto.
5. Cabine de jateamento para limpeza de componentes de motor, adaptadores para a instrumentação, velas de ignição, entre outros.
6. Detector de vazamento de gás hidrogênio: Equipamento essencial para garantir a segurança durante os testes de motores a hidrogênio.

Serviços de Terceiros: Como serviços de terceiros será necessária a aquisição da licença do software Bosch MotorSport para liberar o acesso da unidade de controle aos bancos de injeção direta e indireta de maneira conjunta, possibilitando operação com estratégias avançadas de injeção.

g) Resultados previstos:

Resultados do ponto de vista técnico-científico:

1. Identificação das condições termodinâmicas que limitam a ocorrência de combustão estável/ótima mediante diluição com ar ou EGR
2. Identificação de avenidas para redução de NO_x na combustão com biohidrogênio
3. Geração de modelos computacionais validados, aptos para este e para projetos futuros, empregando a tecnologia proposta
4. Potencial maior de atendimento a futuras normas e legislações de eficiência e emissões
5. Grande atenção para os resultados gerados, a serem publicados e **difundidos** em publicações científicas e em eventos científicos.

6. Grande capacitação de recursos humanos na pesquisa com biohidrogênio: os alunos e pesquisadores terão intenso aprendizado com os desenvolvimentos advindos do projeto, que os capacitam ainda mais para projetos futuros. Para os alunos, isso representa maior empregabilidade. Para as empresas, mão-de-obra especializada. Para o país, desenvolvimento tecnológico.

Resultados do ponto de vista de inovação:

1. O biohidrogênio é visto como o combustível do futuro
2. Não há em solo nacional nenhum veículo atualmente rodando com hidrogênio. Os resultados deste projeto visam sua direta aplicação veicular.
3. O uso de injeção de água em motores a hidrogênio como agente de controle de detonação e sua recuperação por condensação da descarga é um conceito **inédito e pioneiro** e faz todo o sentido, pois a descarga do motor a hidrogênio é, praticamente, 100% constituída de água.

Resultados do ponto de vista perspectivas de transferência e incorporação ao setor automotivo:

1. Os resultados preliminares da tecnologia serão apresentados, primariamente, em um motor monocilíndrico de pesquisas, validando a tecnologia em ambiente relevante, em nível de TRL5.
2. Os resultados finais da tecnologia serão apresentados em um motor, multicilindros automotivos, em uso no mercado nacional, apresentando um protótipo demonstrador em ambiente relevante, em nível de TRL 6.
3. Tal nível de maturidade tecnológica posiciona-se bem próximo da aplicação e, em apresentando resultados satisfatórios, tem um enorme potencial de incorporação ao setor automotivo, pelas possibilidades que oferece com o mínimo ou quase inexistente nível de modificação no hardware original.

c) Cronograma de atividades:

O projeto terá como etapas principais:

1. Atualização bibliográfica: atualizar pesquisa bibliográfica em artigos e patentes a respeito da produção, sistemas de injeção e sistemas de combustão de H₂;

2. Simulação computacional 1-D do motor monocilíndrico: implementação de modelo termodinâmico inicial no software GT-Power para análises com diferentes formas de injeção (direta e indireta) e de limites de operação, com variação da razão ar/combustível, do ponto de ignição para varredura de ocorrência de *knock*, da carga aplicada e da razão de compressão.
3. Simulação computacional 3-D no software de fluidodinâmica Converge: reprodução de um modelo fiel do motor Ricardo Proteus, com análise inicial de *cold flow* em condição *motored* do motor e posterior análise de combustão e emissões, implementando mecanismo cinético de reações apropriado.
4. Testes *baseline* com motor Ricardo Proteus: levantamento de possíveis alterações de geometria do motor, levantamento de requisitos para sistema de injeção e sistema de combustão de H₂, levantamento de sistema de resfriamento para evitar ocorrência de *knock* e *backfire*, levantamento de possíveis formas de uso conjunto de injeção no pórtilo e injeção direta e análise de possíveis adaptações à câmara de combustão para queima biohidrogênio.
5. Estudos paramétricos com simulação computacional 1-D com motor adaptado: variar parâmetros como razão ar/combustível, rotação e carga, razão de compressão com espaçadores, duração da combustão, taxa de liberação de calor, CA50%MFB, etc. e verificar sua influência no desempenho do motor, com biohidrogênio, bem como suas misturas. Identificar requisitos para identificar potenciais desafios para uso de biohidrogênio. Executar DOE (Design Of Experiments) para identificar soluções ótimas.
6. Ensaio do motor adaptado, com diferentes razões de compressão: com os dados da simulação, ensaiar e verificar no motor os resultados ótimos fornecidos pelo DOE. A razão de compressão do motor será adequada por meio de espaçadores, bem como demais parâmetros de controle e calibração. Identificar parâmetros de performance e eficiência termodinâmica, bem como emissões.
7. Ensaios subsequentes no motor monocilíndrico com solução ótima. Verificar operação e parâmetros críticos. Verificar comportamento termodinâmico. Analisar parâmetros de combustão. Realizar correções e definir calibração. Realizar ensaios finais com biohidrogênio. Obter resultados para publicação.
8. Ensaios em motor multicilindros: avaliar em um motor automotivo multicilindros as configurações de operação que levaram às melhores condições de eficiência global e

emissões no motor de bancada adaptado Ricardo Proteus, verificando a viabilidade de utilização dessas tecnologias para a queima de biohidrogênio.

9. Implementação de modelo de redes neurais artificiais para os motores adaptados: desenvolver e aplicar um modelo de machine learning baseado em redes neurais artificiais para a predição de variáveis-chave de operação tanto do motor monocilíndrico como do motor multicilindros, com criação de mapas de operação e varredura de pontos de maior eficiência global e menores emissões, aplicadas todas as condições de operação testadas, como uso de EGR, injeção de água e injeção conjunta PFI+DI.
10. Simular ciclo de condução do motor multicilindros: com os dados gerados e a configuração de maior eficiência determinada na atividade 11, simular no pacote GT-Power um ciclo de condução para um veículo utilizando o motor multicilindros projetado, chegando assim a valores de eficiência, consumo e emissões próximos aos valores esperados para um veículo comercial.
11. Conclusão e divulgação de resultados: As informações e conclusões deste projeto serão organizadas e compiladas em um relatório final, a partir do qual será requerido registro de propriedade intelectual, caso aplicável. Artigos serão publicados em periódicos Qualis A1 nas áreas de Engenharias II e III da CAPES e apresentados em congressos nacionais e internacionais.

As atividades do projeto, bem como os respectivos prazos previstos para sua execução e entrega, estão abaixo apresentadas em um cronograma:

Trimestre	Atividades previstas e execução informada em relatório	Etapas do projeto	Responsável
1	Relatório trimestral de atividades e prestação de contas	1.1	Nina Salau
	Ajustes de equipe executora junto à FUNDEP e fundação de apoio	1.3	Nina Salau
	Alocação de recursos para início das atividades	1.4	Nina Salau
	Aquisição de equipamentos e materiais	1.5	Nina Salau
	Revisão bibliográfica sobre sistemas de produção de H ₂	2.1	Nina Salau
	Projeto do motor para combustão e formas de injeção com H ₂	3.1	Thompson Lanza Nova
	Simulação computacional de injeção PFI de H ₂ em condição estequiométrica, em combustão pobre e com diluição por	4.1	Nina Salau

	EGR		
2	Relatório trimestral de atividades e prestação de contas	1.1	Nina Salau
	Ajustes de equipe executora junto à FUNDEP e fundação de apoio	1.3	Nina Salau
	Aquisição de equipamentos e materiais	1.5	Nina Salau
	Revisão bibliográfica sobre sistemas de injeção de H2	2.2	Nina Salau
	Projeto do motor para combustão e formas de injeção com H2	3.1	Thompson Lanzaova
	Simulação computacional de injeção PFI de H2 em condição estequiométrica, em combustão pobre e com diluição por EGR	4.1	Nina Salau
3	Relatório trimestral de atividades e prestação de contas	1.1	Nina Salau
	Aquisição de equipamentos e materiais	1.5	Nina Salau
	Revisão bibliográfica sobre sistemas de combustão para H2	2.3	Nina Salau
	Projeto do motor para combustão e formas de injeção com H2	3.1	Thompson Lanzaova
	Simulação computacional de injeção PFI de H2 em condição estequiométrica, em combustão pobre e com diluição por EGR	4.1	Nina Salau
4	Relatório trimestral de atividades e prestação de contas	1.1	Nina Salau
	Aquisição de equipamentos e materiais	1.5	Nina Salau
	Definição de estratégias e sistemas para injeção de água	3.2	Thompson Lanzaova
	Simulação computacional de injeção PFI de H2 em condição estequiométrica, em combustão pobre e com diluição por EGR	4.1	Nina Salau
5	Relatório trimestral de atividades e prestação de contas	1.1	Nina Salau
	Aquisição de equipamentos e materiais	1.5	Nina Salau
	Definição de estratégias e sistemas para injeção de água	3.2	Thompson Lanzaova
	Projeto para injeção de H2 em motor multicilindros e avaliação da razão volumétrica de compressão	3.3	Thompson Lanzaova
	Simulação computacional de injeção PFI de H2 em condição estequiométrica, em combustão pobre e com diluição por EGR	4.1	Nina Salau

6	Simulação computacional DI em condição estequiométrica, em combustão pobre e com diluição por EGR	4.2	Nina Salau
	Teste com H2 com injeção PFI em regime estequiométrico, em operação pobre e exploração de limite de diluição por EGR frio	5.1	Thompson LanzaNova
	Relatório trimestral de atividades e prestação de contas	1.1	Nina Salau
	Aquisição de equipamentos e materiais	1.5	Nina Salau
	Definição de estratégias e sistemas para injeção de água	3.2	Thompson LanzaNova
	Projeto para injeção de H2 em motor multicilindros e avaliação da razão volumétrica de compressão	3.3	Thompson LanzaNova
	Simulação computacional DI em condição estequiométrica, em combustão pobre e com diluição por EGR	4.2	Nina Salau
7	Teste com H2 com injeção PFI em regime estequiométrico, em operação pobre e exploração de limite de diluição por EGR frio	5.1	Thompson LanzaNova
	Teste da influência da razão de compressão na operação com H2 PFI	5.2	Thompson LanzaNova
	Relatório trimestral de atividades e prestação de contas	1.1	Nina Salau
	Aquisição de equipamentos e materiais	1.5	Nina Salau
	Projeto para injeção de H2 em motor multicilindros e avaliação da razão volumétrica de compressão	3.3	Thompson LanzaNova
	Simulação computacional DI em condição estequiométrica, em combustão pobre e com diluição por EGR	4.2	Nina Salau
	Teste da influência da razão de compressão na operação com H2 PFI	5.2	Thompson LanzaNova
8	Teste com H2 com injeção DI em regime estequiométrico, em operação pobre e exploração de limite de diluição por EGR frio	5.3	Thompson LanzaNova
	Comissionamento de sistemas para operação de motor multicilindros com H2	6.1	Nina Salau
	Relatório trimestral de atividades e prestação de contas	1.1	Nina Salau
	Aquisição de equipamentos e materiais	1.5	Nina Salau
	Projeto para injeção de H2 em motor multicilindros e avaliação da razão volumétrica de compressão	3.3	Thompson LanzaNova

	Simulação computacional DI em condição estequiométrica, em combustão pobre e com diluição por EGR	4.2	Nina Salau
	Simulação computacional de H2 DI/PFI com injeção de água e sobrealimentação	4.3	Nina Salau
	Teste com H2 com injeção DI em regime estequiométrico, em operação pobre e exploração de limite de diluição por EGR frio	5.3	Thompson Lanza nova
	Teste da influência da razão de compressão na operação com H2 DI	5.4	Thompson Lanza nova
	Comissionamento de sistemas para operação de motor multicilindros com H2	6.1	Nina Salau
	Calibração de motor multicilindros com H2 em regime estequiométrico	6.2	Nina Salau
9	Relatório trimestral de atividades e prestação de contas	1.1	Nina Salau
	Simulação computacional de H2 DI/PFI com injeção de água e sobrealimentação	4.3	Nina Salau
	Simulação computacional do motor multicilindros	4.4	Nina Salau
	Teste da influência da razão de compressão na operação com H2 DI	5.4	Thompson Lanza nova
	Teste com sobrealimentação e injeção de água no coletor de admissão ou diretamente no cilindro	5.5	Thompson Lanza nova
	Calibração de motor multicilindros com H2 em regime estequiométrico	6.2	Nina Salau
10	Investigação da influência da estratégia de válvulas na operação com H2	6.3	Nina Salau
	Relatório trimestral de atividades e prestação de contas	1.1	Nina Salau
	Simulação computacional do motor multicilindros	4.4	Nina Salau
	Desenvolvimento de modelo de ANN para traçar mapa de operação de alta eficiência do motor multicilindros	4.5	Nina Salau
	Teste com sobrealimentação e injeção de água no coletor de admissão ou diretamente no cilindro	5.5	Thompson Lanza nova
	Investigação da influência da estratégia de válvulas na operação com H2	6.3	Nina Salau
	Calibração de motor multicilindros com H2 com foco em eficiência de operação (mistura pobre, EGR interna e injeção de água)	6.4	Nina Salau

11	Relatório trimestral de atividades e prestação de contas	1.1	Nina Salau
	Desenvolvimento de modelo de ANN para traçar mapa de operação de alta eficiência do motor multicilindros	4.5	Nina Salau
	Calibração de motor multicilindros com H2 com foco em eficiência de operação (mistura pobre, EGR interna e injeção de água)	6.4	Nina Salau
12	Relatório final e prestação de contas	1.2	Nina Salau
	Calibração de motor multicilindros com H2 com foco em eficiência de operação (mistura pobre, EGR interna e injeção de água)	6.4	Nina Salau

Referências bibliográficas:

- [1] World Intellectual Property Organization (WIPO) Magazine, “Green Technologies: Electric Cars with Hydrogen Fuel Cells.” www.wipo.int/wipo_magazine/en/2009/02/article_0009.html (accessed Oct. 02, 2021).
- [2] McKinsey & Company, “How hydrogen combustion engines can contribute to zero emissions.” www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/how-hydrogen-combustion-engines-can-contribute-to-zero-emissions (accessed Oct. 03, 2021).
- [3] United Nations Climate Change, “Acordo de Paris.” https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (accessed Oct. 03, 2021).
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Sixth Assessment Report.” www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf (accessed Oct. 03, 2021).
- [5] Our World Data, “Emissions by sector.” <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector#energy-electricity-heat-and-transport-73-2> (accessed Oct. 03, 2021).
- [6] Reuters, “Commodities News, Commodity Trading Prices & Data.” www.reuters.com/finance/commodities/beta (accessed Oct. 03, 2021).
- [7] International Energy Agency (IEA), “The future of hydrogen.” https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf (accessed Oct. 03, 2021).
- [8] Ministério de Minas e Energia (MME), “MME apresenta ao CNPE proposta de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2).” www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2 (accessed Oct. 03, 2021).

- [9] Ministério de Minas e Energia (MME), “Resolução N°6, de 20 de abril de 2021.” www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/arquivos/2021/ResoluesCNPE6_2021.pdf (accessed Oct. 03, 2021).
- [10] Ministério de Minas e Energia (MME), “Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2).” www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrognioRelatriodiretrizes.pdf (accessed Oct. 03, 2021).
- [11] I. Dincer and C. Zamfirescu, “Hydrogen Production by Electrical Energy,” in *Sustainable Hydrogen Production*, Elsevier, 2016.
- [12] R. El Mrabet and A. Berrada, “Hydrogen production and derivatives from renewable energy systems for a best valorization of sustainable resources,” in *Hybrid Energy System Models*, Elsevier, 2021.
- [13] I. Dincer and C. Zamfirescu, “Hydrogen Production by Thermal Energy,” in *Sustainable Hydrogen Production*, Elsevier, 2016.
- [14] M. Minutillo, A. Perna, and A. Sorce, “Green hydrogen production plants via biogas steam and autothermal reforming processes: energy and exergy analyses,” *Appl. Energy*, vol. 277, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115452.
- [15] Ram B. Gupta, Angelo Basile, and T. Nejat Veziroğlu, Eds., *Compendium of Hydrogen Energy. Volume 2: Hydrogen Storage, Distribution and Infrastructure*, vol. 2. Elsevier, 2016.
- [16] K. Yamane, “Hydrogen Fueled ICE, Successfully Overcoming Challenges through High Pressure Direct Injection Technologies: 40 Years of Japanese Hydrogen ICE Research and Development,” Apr. 2018, doi: 10.4271/2018-01-1145.
- [17] T. Sinigaglia, F. Lewiski, M. E. Santos Martins, and J. C. Mairesse Siluk, “Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 39, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.063.
- [18] J. L. Silveira, L. B. Braga, A. C. C. de Souza, J. S. Antunes, and R. Zanzi, “The benefits of ethanol use for hydrogen production in urban transportation,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 9, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.06.032.
- [19] A. Molino, V. Larocca, S. Chianese, and D. Musmarra, “Biofuels Production by Biomass Gasification: A Review,” *Energies*, vol. 11, no. 4, Mar. 2018, doi: 10.3390/en11040811.
- [20] C. E. Tuna, J. L. Silveira, M. E. da Silva, R. M. Boloy, L. B. Braga, and N. P. Pérez, “Biogas steam reformer for hydrogen production: Evaluation of the reformer prototype

- and catalysts,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 4, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.008.
- [21] V. P. Rathod, J. Shete, and P. V. Bhale, “Experimental investigation on biogas reforming to hydrogen rich syngas production using solar energy,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 1, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.09.158.
- [22] C. Coskun, M. Bayraktar, Z. Oktay, and I. Dincer, “Investigation of biogas and hydrogen production from waste water of milk-processing industry in Turkey,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 21, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.02.174.
- [23] F. Battista *et al.*, “LCA evaluation for the hydrogen production from biogas through the innovative BioRobur project concept,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 19, May 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.12.065.
- [24] L. R. A. Ferreira, R. B. Otto, F. P. Silva, S. N. M. De Souza, S. S. De Souza, and O. H. Ando Junior, “Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 94, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.06.034.
- [25] R. M. Barros *et al.*, “A potential of the biogas generating and energy recovering from municipal solid waste,” *Renew. Energy Focus*, vol. 25, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.ref.2018.02.001.
- [26] L. La Picirelli de Souza *et al.*, “Theoretical and technical assessment of agroforestry residue potential for electricity generation in Brazil towards 2050,” *Energy Reports*, vol. 7, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.04.026.
- [27] Governo do Estado de Santa Catarina, “Biometano pode auxiliar no suprimento do mercado catarinense de gás natural.” www.sc.gov.br/noticias/temas/desenvolvimento-economico/biometano-pode-auxiliar-no-suprimento-do-mercado-catarinense-de-gas-natural (accessed Oct. 03, 2021).
- [28] GZH, “Geração de biogás utiliza apenas 1,3% do potencial no país .”
- [29] Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CESTEB), “Investimentos no segmento de biogás devem atingir R\$ 50 bilhões até 2030.” .
- [30] Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), “Marco do Saneamento Básico - Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020.” www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm#art7 (accessed Oct. 03, 2021).
- [31] R. Babayev, A. Andersson, A. Serra Dalmau, H. G. Im, and B. Johansson,

- “Computational comparison of the conventional diesel and hydrogen direct-injection compression-ignition combustion engines,” *Fuel*, vol. 307, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121909.
- [32] C. Gong, Z. Li, L. Yi, and F. Liu, “Comparative study on combustion and emissions between methanol port-injection engine and methanol direct-injection engine with H₂-enriched port-injection under lean-burn conditions,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 200, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112096.
- [33] M. Ozcanli, O. Bas, M. A. Akar, S. Yildizhan, and H. Serin, “Recent studies on hydrogen usage in Wankel SI engine,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 38, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.202.
- [34] C. Yuan, J. Xu, and Y. He, “Performance characteristics analysis of a hydrogen fueled free-piston engine generator,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 4, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.037.
- [35] E. Z. Zainal A *et al.*, “Effect of aspect ratio on the performance characteristics of free piston linear generator engine fueled by hydrogen,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 17, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.122.
- [36] J. Gao, G. Tian, C. Ma, L. Huang, and S. Xing, “Explorations of the impacts on a hydrogen fuelled opposed rotary piston engine performance by ignition timing under part load conditions,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 21, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.030.
- [37] J. Gao, X. Wang, G. Tian, P. Song, C. Ma, and L. Huang, “Effect of hydrogen direct injection strategies and ignition timing on hydrogen diffusion, energy distributions and NO emissions from an opposed rotary piston engine,” *Fuel*, vol. 306, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121656.
- [38] L. M. Das, “Hydrogen-fueled internal combustion engines,” in *Compendium of Hydrogen Energy*, Elsevier, 2016.
- [39] Toyota, “Toyota Developing Hydrogen Engine Technologies Through Motorsports.” <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/35209996.html> (accessed Oct. 03, 2021).
- [40] Mazda, “Hydrogen Vehicle.” www.mazda.com/en/innovation/technology/env/hre/ (accessed Oct. 03, 2021).
- [41] Cummins, “Cummins begins testing of hydrogen fueled internal combustion engine.” .
- [42] AVL, “Press Release: AVL Advances Development of Hydrogen Internal Combustion Engine for CO₂ Neutral Transportation.” www.avl.com/all-press-releases/-

/asset_publisher/0RuLfkhFPSCT/content/press-release-avl-advances-development-of-hydrogen-internal-combustion-engine-for-co2-neutral-transportation (accessed Oct. 03, 2021).

- [43] J. Gao, X. Wang, P. Song, G. Tian, and C. Ma, “Review of the backfire occurrences and control strategies for port hydrogen injection internal combustion engines,” *Fuel*, vol. 307, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121553.
- [44] G. Nicoletti, N. Arcuri, G. Nicoletti, and R. Bruno, “A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 89, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2014.09.057.
- [45] F. Yan, L. Xu, and Y. Wang, “Application of hydrogen enriched natural gas in spark ignition IC engines: from fundamental fuel properties to engine performances and emissions,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.227.
- [46] C. Bae and J. Kim, “Alternative fuels for internal combustion engines,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 36, no. 3, 2017, doi: 10.1016/j.proci.2016.09.009.
- [47] X. Li, X. Zhen, S. Xu, Y. Wang, D. Liu, and Z. Tian, “Numerical comparative study on knocking combustion of high compression ratio spark ignition engine fueled with methanol, ethanol and methane based on detailed chemical kinetics,” *Fuel*, vol. 306, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121615.
- [48] Z. Wang, H. Liu, and R. D. Reitz, “Knocking combustion in spark-ignition engines,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 61, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.pecs.2017.03.004.
- [49] C. Tornatore, D. Siano, L. Marchitto, A. Iacobacci, G. Valentino, and F. Bozza, “Water Injection: a Technology to Improve Performance and Emissions of Downsized Turbocharged Spark Ignited Engines,” *SAE Int. J. Engines*, vol. 10, no. 5, Sep. 2017, doi: 10.4271/2017-24-0062.
- [50] F. Hoppe, M. Thewes, H. Baumgarten, and J. Dohmen, “Water injection for gasoline engines: Potentials, challenges, and solutions,” *Int. J. Engine Res.*, vol. 17, no. 1, Jan. 2016, doi: 10.1177/1468087415599867.
- [51] M. S. Soyelmez, “Water Injection Effects on the Performance of Four-Cylinder, LPG Fuelled SI Engine,” *J. Bacteriol. Parasitol.*, vol. S1, no. 01, 2013, doi: 10.4172/scientificreports.591.
- [52] J. Kim, H. Park, C. Bae, M. Choi, and Y. Kwak, “Effects of water direct injection on the torque enhancement and fuel consumption reduction of a gasoline engine under high-

- load conditions,” *Int. J. Engine Res.*, vol. 17, no. 7, Sep. 2016, doi: 10.1177/1468087415613221.
- [53] D. Busuttil and M. Farrugia, “Experimental investigation on the effect of injecting water to the air to fuel mixture in a spark ignition engine,” *MM Sci. J.*, vol. 2015, no. 01, Mar. 2015, doi: 10.17973/MMSJ.2015_03_201510.
- [54] A. Iacobacci, L. Marchitto, and G. Valentino, “Water Injection to Enhance Performance and Emissions of a Turbocharged Gasoline Engine under High Load Condition,” *SAE Int. J. Engines*, vol. 10, no. 3, Mar. 2017, doi: 10.4271/2017-01-0660.
- [55] N. Garrido Gonzalez, R. Baar, J. Drueckhammer, and C. Kaepfner, “The Thermodynamics of Exhaust Gas Condensation,” *SAE Int. J. Engines*, vol. 10, no. 4, Jun. 2017, doi: 10.4271/2017-01-9281.
- [56] A. Vaudrey and J. Cuisano, “Internal combustion engines water injection fed by Exhaust Water Recirculation (EWR): a feasibility analysis,” *Automot. Engine Technol.*, vol. 5, no. 1–2, Jun. 2020, doi: 10.1007/s41104-019-00055-9.
- [57] Ministério do Meio Ambiente (MMA), “Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR) - Resolução CONAMA nº 5, de 15 de junho de 1989.” .
- [58] Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, “Programa de controle de emissões veiculares (Proconve),” Accessed: Oct. 03, 2021. [Online]. Available: www.ibama.gov.br/emissoes/veiculos-automotores/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve.
- [59] Ministério da Economia (ME), “Rota 2030 - Mobilidade e Logística.” www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica (accessed Oct. 03, 2021).
- [60] Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (Fundep), “Resultado FINAL Programa: Rota2030 - FUNDEP - LINHA V Chamada nº 01/2020.” <https://rota2030.fundep.ufmg.br/wp-content/uploads/2020/08/Resultado-Final-Linha-V.pdf> (accessed Oct. 03, 2021).