REVISTA DA ABPN

DOI 10.31418/2177-2770.2022.v14.n41.p143-166 | ISSN 2177-2770
Licenciado sob uma Licença Creative Commons

REVISÃO SOBRE A ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO COMO FORMA DE MAXIMIZAR O POTENCIAL DO ETANOL NO TRANSPORTE BRASILEIRO

Sami Massalami Mohammed Elmassalami Ayad[1]
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Mecânica - COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Carlos Rodrigues Pereira Belchior[2]
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Mecânica - COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

José Ricardo Sodré[3]
Aston University, Mechanical Engineering, Biomedical Engineering and Design, College of Engineering and Physical Sciences, Birmingham, United Kingdom

Resumo: O presente trabalho apresenta uma revisão sobre o uso de hidrogênio como forma de maximizar o potencial do etanol como combustível para uso no setor de transporte. Desta forma, é apresentada uma breve discussão sobre o futuro de motores de combustão interna e como eles podem encontrar espaço num futuro de mobilidade híbrida. Neste cenário, o uso de etanol em substituição à gasolina é uma forte alternativa para o Brasil, porém, existem alguns desafios ao seu uso. Como solução a estes desafios, propõe-se a adoção de um regime de operação com adição de hidrogênio, excesso de ar e turbocarregamento. Uma revisão sobre as tendências esperadas do ponto de vista da segunda lei da termodinâmica confirma o potencial deste regime de operação em motores a etanol com adição de hidrogênio e conclui-se que trabalhos futuros devem explorar este potencial.

Palavras-chave: Etanol, hidrogênio, motores de combustão interna, biocombustíveis.

REVIEW ON HYDROGEN ENRICHMENT AS A WAY TO MAXIMIZE ETHANOL'S POTENTIAL IN BRAZILIAN TRANSPORTATION

[1] Sami Massalami Mohammed Elmassalami Ayad, D.Sc., Federal University of Rio de Janeiro, Department of Mechanical Engineering, Rio de Janeiro, Brazil. E-mail: massalami@gmail.com ; ORCID: 0000-0002-9442-0457.

[2] Carlos Rodrigues Pereira Belchior, D.Sc., Federal University of Rio de Janeiro Department of Mechanical Engineering, Rio de Janeiro, Brazil. E-mail: belchior@oceanica.ufrj.br ; ORCID: 0000-0002-9111-6214

[3] José Ricardo Sodré, Ph.D., Department of Mechanical Engineering, Biomedical Engineering and Design, College of Engineering and Physical Sciences, Aston University, Birmingham, UK. E-mail: j.sodre@aston.ac.uk ; ORCID: 0000-0003-2243-8719

Abstract: The present work presents a review on hydrogen use as a way of maximizing ethanol's potential as a transportation fuel. In this way, a brief discussion about the future of internal combustion engines and how they can be positioned in a future of hybrid mobility is presented. In this scenario, the use of ethanol instead of gasoline is a strong alternative for Brazil, even though there might be some challenges to its use. As a solution to these challenges, an operating regime with the addition of hydrogen, excess air and turbocharging is proposed for these engines in a series hybrid configuration. A review of the expected trends from the point of view of the second law of thermodynamics confirms the potential of this operating regime in ethanol engines with the addition of hydrogen and it is concluded that future works should explore this potential.

Keywords: Ethanol, hydrogen, internal combustion engines, biofuels.

REVISIÓN SOBRE EL ENRIQUECIMIENTO DE HIDRÓGENO COMO FORMA DE MAXIMIZAR EL POTENCIAL DEL ETANOL EN EL TRANSPORTE BRASILEÑO

Resumen: El presente trabajo presenta una revisión sobre el uso del hidrógeno como una forma de maximizar el potencial del etanol como combustible para el transporte. De esta forma, se presenta la breve discusión sobre el futuro de los motores de combustión interna y cómo se pueden posicionar en un futuro de movilidad híbrida. En este escenario, el uso de etanol en lugar de gasolina es una fuerte alternativa para Brasil, aunque puede haber algunos desafíos para su uso. Como solución a estos retos, se propone un régimen de funcionamiento con adición de hidrógeno, exceso de aire y turboalimentación para estos motores en configuración híbrida serie. Una revisión de las tendencias esperadas desde el punto de vista de la segunda ley de la termodinámica confirma el potencial de este régimen de operación en motores de etanol con adición de hidrógeno y se concluye que futuros trabajos deberían explorar este potencial.

Palabras-clave: Etanol, hidrógeno, motores de combustión interna, biocombustibles

REVUE SUR L'ENRICHISSEMENT EN HYDROGÈNE COMME MOYEN DE MAXIMISER LE POTENTIEL DE L'ÉTHANOL DANS LE TRANSPORT BRÉSILIEN

Resumé: Le présent travail présente un examen de l'utilisation de l'hydrogène comme moyen de maximiser le potentiel de l'éthanol comme carburant de transport. De cette façon, la brève discussion sur l'avenir des moteurs à combustion interne et comment ils peuvent être positionnés dans un avenir de mobilité hybride est présentée. Dans ce scénario, l'utilisation de l'éthanol au lieu de l'essence est une alternative solide pour le Brésil, même si son utilisation pourrait présenter des défis. Comme solution à ces défis, un régime de fonctionnement avec ajout d'hydrogène, d'air en excès et de suralimentation est proposé pour ces moteurs dans une configuration hybride série. Un examen des tendances attendues du point de vue de la deuxième loi de la thermodynamique confirme le potentiel de ce régime de fonctionnement dans les moteurs à éthanol avec ajout d'hydrogène et il est conclu que des travaux futurs devraient explorer ce potentiel.

Mots-clés: Ethanol, hydrogène, moteurs à combustion interne, biocarburants.

INTRODUÇÃO

Existe uma correlação direta entre a capacidade de crescimento econômico de um país e seu acesso a recursos energéticos. Porém, esta demanda energética deve ser suprida de modo responsável, atendendo a preocupações de segurança energética, emissões de gases do efeito estufa (GEE) e gases poluentes e nocivos à saúde. No Brasil, os combustíveis fósseis corresponderam a 72% da demanda energética no setor de transporte, e foram responsáveis por 59% das emissões de CO2 em 2019 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020). Assim, as preocupações em obter um crescimento sustentável, intensificaram a busca por matrizes energéticas alternativas, sendo estabelecidos os programas Rota 2030, a Política Automotiva Nacional (CASA CIVIL DA PRESIDÊNCIA DO BRASIL, [S.d.]), e RenovaBio, a Política Nacional de Biocombustíveis (CASA CIVIL DA PRESIDÊNCIA DO BRASIL, [S.d.]), buscando ampliar a adoção de biocombustíveis e estabelecer metas de eficiência e emissões para os automóveis. É neste contexto que este trabalho discute como motores de combustão interna (MCI) possuem espaço numa visão de futuro sustentável no Brasil, contanto que sejam realizadas as devidas adaptações ao combustível, à aplicação, e ao modo de operação destes motores.

O primeiro passo consiste na substituição de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos, que devem possuir propriedades que sejam compatíveis com o uso em motores. Um exemplo é o etanol, que é um biocombustível notável no contexto brasileiro. O Brasil possui infraestrutura e cadeia de produção de etanol consolidadas e é o maior produtor de etanol a partir da cana de açúcar (GARCÍA, MONSALVE-SERRANO, et al., 2020a). O etanol possui um balanço neutro de carbono e possui benefícios quando usado em motores comparado com a gasolina. Porém, estes benefícios são limitados nos motores flexfuéis atuais, onde o seu uso se mostra desfavorável devido a sua menor densidade energética volumétrica. De modo a compensar estas deficiências, este trabalho propõe adaptações à aplicação dos MCI operando a etanol, assim como ao seu regime de operação.

A aplicação proposta é o uso destes motores em grupo gerador para alimentar a bateria de veículos com propulsão elétrica, visando permitir que esta tecnologia possa participar nos cenários futuros de mobilidade. A Associação Brasileira de Engenharia

Automotiva (2017) projeta que a matriz energética do Brasil apresentaria menores emissões que o cenário europeu no cenário de veículos puramente elétricos. Porém, este cenário requiriria investimento significativo em infraestrutura para que as redes de eletricidade possam suportar o aumento resultante de demanda (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020). Portanto, uma opção mais viável a médio e curto prazo para o Brasil seria o uso dos MCI a etanol em veículos híbrido-elétricos, os quais se inserem no meio termo entre os veículos puramente elétricos e os de combustão interna a etanol. Estes veículos híbridos possuem configurações entre o motor de combustão interna e o motor elétrico que podem ser paralelas ou em série. Na configuração em paralelo, tanto o MCI quanto o motor elétrico contribuem para a propulsão. Por outro lado, na configuração em série, o MCI é acoplado a um gerador e usado para carregar as baterias do veículo. Estas baterias alimentam o motor elétrico, que traciona o veículo. Por isso, esta configuração também é conhecida como extensor de autonomia e permite carregar as baterias de veículos puramente elétricos. Desta forma, este conjunto opera em rotação constante em seu ponto de maior eficiência.

Ainda mais, esta configuração híbrido-série com MCI possui os menores custos totais de propriedade quando comparado com veículos puramente elétricos, híbridos em paralelo, e híbridos com pilha a combustível (BURNHAM, GOHLKE, et al., 2021) Como consequência, extensores de autonomia a etanol se apresentam como uma opção promissora e competitiva no curto e médio prazo. Além disso, o uso de tração elétrica em conjunto com estes extensores de autonomia é uma alternativa para substituir os veículos pesados movidos a Diesel, como no ônibus Híbrido Elétrico-Etanol desenvolvido pelo Laboratório de Hidrogênio da COPPE. Os motores a Diesel, diferente daqueles a etanol, produzem material particulado, que é extremamente nocivo à saúde e responsável por um número significativo de hospitalizações e mortes em centros urbanos (ANDREÃO, PINTO, et al., 2020).

Finalmente, a aplicação como extensor de autonomia favorece a operação no regime de máxima eficiência, e como consequência, poderia se beneficiar da operação conjunta com adição de hidrogênio, operação em regime pobre, e turboalimentação. A adição de hidrogênio ao etanol é uma maneira de compensar as deficiências do etanol como combustível em MCI. Isto ocorre pois o hidrogênio possui propriedades favoráveis a seu uso como combustível em MCI. Entre estas propriedades, é possível destacar seu alto poder calorífico inferior, velocidade de chama, e resistência à detonação (AYAD,

Sami M.M.E., BELCHIOR, et al., 2020). Se produzido a partir de insumos renováveis, a queima de hidrogênio gera em sua maioria emissões não tóxicas. Por outro lado, a sua alta temperatura de chama pode aumentar a produção de óxidos de nitrogênio (NOx) em MCI (ROCHA, PEREIRA, et al., 2017). Uma maneira de reduzir as emissões de NOx é a operação em regime de operação pobre ou excesso de ar. O grau de excesso de ar da mistura depende das propriedades do combustível usado.

Assim, a adição de hidrogênio favorece esse modo de operação devido à sua ampla faixa de inflamabilidade. Sua alta velocidade de chama aproxima o processo de combustão de uma adição de calor a volume constante do ciclo Otto, ciclo de operação de motores de ignição por centelha. Da mesma forma, sua baixa energia mínima de ignição facilita a formação de núcleos de chama estáveis e autossustentáveis. Deste modo, a adição de hidrogênio estende o limite de inflamabilidade de outros combustíveis (RAVI, MATHEW, et al., 2017). Portanto, a combustão ocorre em regimes pobres ou diluídos, que permitem um melhor controle de emissões e por altas eficiências, mas pode acarretar perda de potência em motores de combustão interna. Consequentemente, a adoção conjunta de um turboalimentador pode compensar estas perdas através do sobrecarregamento do ar admitido no motor.

Não obstante, a avaliação de um sistema de geração de potência não deve ser restrita apenas a uma análise de energia. Ela deve ser capaz de aplicar tecnologia eficiente e melhorar a conversão de recursos energéticos na sociedade (JABER, AL-GHANDOOR, et al., 2008). Nesse sentido, a análise exergética é uma ferramenta para projeto e investigação de sistemas. Esta abordagem se diferencia pois considera as irreversibilidades na avaliação de processos e sistemas (MERT, DINCER, et al., 2007). O uso da análise exergética contribui para: (i) ajudar a impulsionar melhorias tecnológicas (BALDI, JOHNSON, et al., 2014); (ii) apresentar percepções políticas relevantes para melhorar o consumo de energia e as emissões de GEE (BYERS, GASPARATOS, et al., 2015); (iii) identificar os melhores caminhos para a descarbonização global (VALERO, VALERO, et al., 2018).

Este trabalho revisou o estado da arte na literatura sobre o enriquecimento de hidrogênio em motores de ignição por centelha. O potencial da combinação entre etanol e hidrogênio foi pouco investigado nos últimos 5 anos. Portanto, inicia-se com uma revisão geral sobre o enriquecimento de hidrogênio à gasolina e outros combustíveis, e o uso de hidrogênio em motores turboalimentados. Em seguida, serão apresentados os

resultados relacionados à adição de hidrogênio ao etanol combustível, experimentais ou numéricos. Finalmente, são apresentadas as tendencias de adição de hidrogênio identificadas através da análise exergética e as conclusões resultantes.

HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL SUPLEMENTAR

O uso de hidrogênio em motores de ignição por centelha pode ser tanto como combustível primário ou como combustível suplementar. Neste modo de operação, hidrogênio pode ser adicionado à gasolina, gás natural ou biogás, e outros combustíveis.

Devido a sua alta velocidade de propagação de chama, a adição de hidrogênio em motores de ignição por centelha resulta em redução da duração da combustão, com aumento da fração de hidrogênio (JI, ZHANG, et al., 2013, WANG, Jinhua, HUANG, et al., 2010). Além disso, sua ampla faixa de inflamabilidade e baixa energia de ignição permitem a operação em regimes de mistura pobre ou diluída, com aumento da estabilidade de combustão. A adição de hidrogênio geralmente acarreta redução de HC e CO, devido à ausência de carbono em sua composição. Por outro lado, sua alta temperatura de queima causa aumento de NOx, mas a operação em regimes de mistura pobre ou diluída é uma opção para redução das emissões de NOx (Jordan, 2012). O uso de sobrealimentação, por sua vez, também possui alto potencial para aplicações com adição de hidrogênio, especialmente nestes regimes pobres, nos quais pode ocorrer perda de potência (PARK, SONG, 2014).

Ji *et al*. (2013) investigaram numericamente um motor de ignição por faísca operando com gasolina misturada com 3–6% v/v de hidrogênio. Os autores notaram que pressão de combustão aumenta com o aumento da fração de hidrogênio devido à sua alta temperatura de queima. Por outro lado, a adição de hidrogênio causa redução da duração da combustão graças a sua alta velocidade de propagação de chama. Assim sendo, estes resultados indicam o potencial da adição de hidrogênio em melhorar a eficiência e desempenho de motores de ignição por centelha, apesar de eles também favorecerem aumento das emissões de NOx através de seu mecanismo térmico de formação.

Um motor sobrealimentado operando com gasolina, etanol, metanol, propano e hidrogênio foi explorado numericamente por Mardi et al. (2014). Este estudo verificou a influência da recirculação dos gases de exaustão (exhaust gas recirculation - EGR) na operação do motor com estes combustíveis. Os autores observaram que a pressão média

efetiva e a velocidade de propagação da chama diminuíram com maior grau de diluição com EGR. Este comportamento é esperado devido à diluição da mistura e consequente redução da temperatura no cilindro. No entanto, essa influência foi menos pronunciada na operação com hidrogênio puro que obteve os melhores resultados de desempenho. A ampla faixa de inflamabilidade do hidrogênio permite operação em regime de mistura diluída. Ademais, o hidrogênio puro não apresentou emissões de CO2, CO, e HC, uma vez que este combustível não possui carbono em sua composição. Desta forma, estes resultados indicaram que a operação conjunta de sobrealimentação e regimes de mistura diluídos podem ter uma contribuição positiva nas emissões e no desempenho, mas o regime diluído é limitado pela faixa de inflamabilidade do combustível.

Karagoz *et al*. (2015) investigaram experimentalmente a adição estequiométrica de uma mistura gasosa de hidrogênio e oxigênio ao combustível de um motor a gasolina. Esta mistura é resultante da eletrólise da água. Os autores notaram aumento no desempenho, eficiência térmica e NOx, enquanto o consumo específico de combustível (*brake specific fuel consumption* – BSFC) e as emissões de HC e CO diminuíram. Estes resultados mostraram que a mistura de hidrogênio e oxigênio proveniente de eletrólise também pode apresentar os benefícios e deficiências do hidrogênio puro, e apresenta potencial para produção embarcada. Porém, este potencial deve ser avaliado do ponto de vista técnico-econômico, para garantir que esta produção seja sustentável em condições reais de operação.

As características da partida a frio de um motor de ignição por faísca bicombustível foram estudadas por Wu et al. (2016). Este motor possui injeção direta de gasolina e indireta de hidrogênio. O motor operou com misturas de gasolina-hidrogênio e hidrogênio puro. Os resultados mostraram que as emissões de CO e HC foram drasticamente reduzidas com a adição de hidrogênio quando comparadas com a gasolina pura. Por outro lado, as emissões de NOx aumentaram. Desta forma, conclui-se que uso do hidrogênio puro pode resolver as preocupações relacionadas à alta produção de HC e CO durante a partida à frio, apesar do aumento nas emissões de NOx.

A influência da variação de carga mecânica e adição de hidrogênio à gasolina em um MIF foi investigada (ELSEMARY, ATTIA, et al., 2016). Esses ensaios foram realizados em um motor monocilíndrico operando a velocidade constante de 3000 rpm. Os autores notaram que o enriquecimento de hidrogênio melhorou o consumo de combustível, a eficiência térmica e as emissões de HC e CO. Essa melhora ocorreu para

valores de até 31% m/m de conteúdo de hidrogênio. Para valores superiores a 31% m/m, esses parâmetros começaram a se deteriorar. Estes resultados indicam que existe um limite para o qual a adição de hidrogênio a outros combustíveis é favorável. Uma possível explicação para a deterioração a partir deste ponto pode ser o deslocamento do ar de admissão pelo hidrogênio, o que poderia resultar em uma queima menos homogênea, uma vez que o hidrogênio é consumido de forma mais rápida que a gasolina. Este processo poderia ser com uma injeção direta de hidrogênio no interior do cilindro, mas isto requer extensas modificações físicas no motor e seu sistema de injeção.

Martinez-Boggio *et al*. (2016) investigaram numericamente um motor de ignição por centelha operando com misturas de gasolina-hidrogênio. A composição da mistura foi nas proporções de 0, 25, 50, 75 e 100% de hidrogênio em v/v na mistura combustível. A potência no eixo permaneceu constante até 75% de hidrogênio na mistura. Para valores acima disso, o hidrogênio desloca parte do ar na admissão. Como consequência, a redução de ar disponível para combustão resulta em menores eficiência volumétrica e a potência desenvolvida. No entanto, os autores notaram que qualquer porcentagem de hidrogênio reduz a covariância da pressão efetiva média indicada. Essa redução indica melhora na estabilidade da combustão e redução das falhas de ignição do combustível no interior do cilindro, também conhecido como o fenômeno de *misfire*.

Um estudo experimental foi realizado em um motor com injeção direta de gasolina e injeção indireta de hidrogênio no coletor de admissão (NIU, YU, et al., 2016). O hidrogênio foi injetado em proporções de 3,9%, 5,3%, 7,2%, 8,9% e 10,5% do ar de admissão e misturas pobres com proporções variáveis de excesso de ar. Os autores observaram que a adição de hidrogênio aumentou a pressão de combustão, a eficiência térmica e as emissões de NOx para as diferentes razões de excesso de ar. No entanto, também foi observado que a duração da queima, a covariância da pressão efetiva média indicada e as emissões de CO e HC também diminuíram com o enriquecimento de hidrogênio. Assim sendo, espera-se que a adição de hidrogênio favoreça a estabilidade da combustão até mesmo em regimes com excesso de ar, nos quais a combustão geralmente deteriora.

Yu *et al.* (2016) continuaram este estudo e investigaram experimentalmente a variação ciclo a ciclo de um motor a gasolina operando com misturas pobres e adição de hidrogênio. Esta variação também é um indicador de que a combustão está ocorrendo sem problemas. Os autores observaram que há um tempo de ignição ótimo que reduz a

variação de ciclo por ciclo para todos os casos de operação com excesso de ar. Este tempo corresponde a um pequeno atraso em relação ao tempo de ignição que resulta em torque máximo no eixo (maximum brake torque spark timing– MBT spark timing). O enriquecimento de hidrogênio aumenta o pico de pressão no cilindro e a pressão efetiva média, enquanto reduz a variação ciclo a ciclo, especialmente em misturas pobres. Portanto, o ajuste do tempo de ignição, e consequentemente da fase de combustão, em conjunto com a adição de hidrogênio e operação em regime pobre precisam ser balanceados para uma calibração adequada do motor.

Uma pesquisa sobre modelagem, controle de biocombustíveis e sistemas de supervisão aplicados em motores de combustão interna foi apresentada por Carbot-Rojas et al. (2017). Quando se trata de modelagem, os autores observam que novas técnicas de estimativa e melhorias em processadores de computador levaram a modelos mais precisos. Além disso, os autores fazem uma revisão dos biocombustíveis que podem substituir a gasolina. Entre esses biocombustíveis, destacam-se o etanol, hidrogênio, metanol, n-butanol ou misturas entre esses combustíveis. Os autores observam que a adição de hidrogênio diminui as emissões de CO_2 e CO, enquanto aumenta as emissões de NOx e as eficiências térmicas e de combustão. Estas tendências confirmam os comportamentos observados em outros trabalhos experimentais e confirma o potencial de trabalhos numéricos para complementar análises de motores e combustíveis alternativos.

Ma *et al*. (2008) exploraram experimentalmente o comportamento da combustão e as variações ciclo a ciclo em um motor de ignição por faísca turboalimentado de operação em regime pobre a gás natural operando com enriquecimento de hidrogênio. Os experimentos foram conduzidos em uma ampla faixa de níveis de enriquecimento de hidrogênio, razões de equivalência, tempos de ignição, pressões de admissão, e velocidades de rotação do motor. Os autores observaram que a adição de hidrogênio reduziu o coeficiente de variação da pressão efetiva média indicada (coeficient of variation of indicated mean effective pressure - COVimep) para todos os tempos de ignição que foram atrasados do tempo de MBT. Este atraso causou aumento na eficiência térmica e menores emissões de NOx, especialmente em condições mais pobres. Uma conclusão importante é que o hidrogênio foi bem-sucedido em estender o limite de queima pobre do gás natural. Finalmente, este trabalho mostrou que a adição de hidrogênio ao gás natural possui características suplementares semelhantes àquelas observadas para a gasolina.

Uma pesquisa numérica foi realizada em um motor-gerador alimentado com biogás à base de metano enriquecido com hidrogênio por Park e Song (2014). Os autores usaram uma simulação quase-dimensional e metodologia de planejamento experimental (*design of experiment* – DOE). Eles variaram a pressão de boost da turbina, a razão de excesso de ar, o tempo de ignição, e a composição do biogás. Os ensaios foram realizados em duas condições. A saber, estas foram o tempo de MBT e a condição de combustível mínimo de entrada (*minimum input fuel* - MIF). Os autores validaram e calibraram o modelo com base em resultados experimentais. Sob a condição de MIF, tanto o torque quanto a eficiência de combustão diminuíram. Por outro lado, as emissões de NOx e a eficiência de geração de energia aumentaram, devido ao baixo boost do turbocompressor. O hidrogênio foi adicionado sob condições MIF e contribuiu para melhorar a queima de combustível. A condição MIF é muito promissora para regimes de mistura pobre, com turboalimentação e operação com gerador, uma vez que se garante que o motor admita a quantidade de combustível necessária para que a potência se mantenha constante.

O desempenho e as emissões de um motor turboalimentado a gasolina operando com enriquecimento de hidrogênio e EGR foram apurados por Kim et al. (2017). Esse motor operou a 2000 rpm e pressão média efetiva no eixo (*brake mean effective pressure* – BMEP) igual a 4, 6 e 8 bar. Este trabalhou definiu o conteúdo de hidrogênio na mistura usando a fração de substituição em energia de hidrogênio, que é a razão entre a energia do hidrogênio e a soma da energia da gasolina consumida e do hidrogênio adicionado. Os casos foram medidos em 0%, 1%, 3% e 5% da fração de energia do hidrogênio. Os autores observaram que o hidrogênio melhorou a velocidade de combustão e a variação de ciclo a ciclo, especialmente em valores com alto EGR. Além disso, a eficiência térmica indicada melhorou com enriquecimento de hidrogênio e aumento da carga mecânica. O limite de EGR também melhorou com a adição de hidrogênio, assim como as emissões de HC, que diminuíram. Enquanto isso, as emissões de NOx aumentaram devido às maiores temperaturas de combustão. Finalmente, as emissões de CO e CO_2 seguiram tendências diferentes dependendo da carga do motor e do conteúdo de hidrogênio. Esta última tendência pode ser explicada devido à EGR, que apesar de redução de NOx, pode deteriorar estas outras emissões.

ESTADO DA ARTE DA ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO AO ETANOL

O potencial da mistura etanol-hidrogênio foi pouco investigado na literatura nos últimos 5 anos. Ademais, os trabalhos anteriores a este período não lidam com motores turboalimentados, e apenas um outro trabalho trata da operação visando mobilidade híbrida ou geração estacionária de eletricidade. Entre todos estes trabalhos, poucos envolveram estudos numéricos. No estado da arte de enriquecimento de etanol com hidrogênio, foram identificadas três principais áreas de investigação: (i) operação em regime ultra pobre para redução de emissões; (ii) operação em marcha lenta em regime estequiométrico com adição de hidrogênio para redução de emissões; e (iii) produção embarcada de hidrogênio. Estas áreas de investigação apontaram algumas tendências que serão apresentadas a seguir.

Testes experimentais da adição de hidrogênio no etanol em um motor de razão de compressão variável CFR mostraram que a adição de hidrogênio reduz o consumo específico de combustível (AL-BAGHDADI, 2003). Os autores variaram o conteúdo de hidrogênio na mistura de etanol e hidrogênio e a razão de compressão. Os resultados obtidos foram comparados com a operação com gasolina e menor taxa de compressão. A adição de hidrogênio compensou o pior consumo de combustível do etanol, e o uso de hidrogênio como combustível suplementar requer pequenas quantidades deste combustível, reduzindo seus requisitos de armazenamento. As maiores taxas de compressão e aumento do conteúdo de H_2 na mistura contribuem para o aumento da temperatura de chama, enquanto o alto calor de vaporização de etanol reduz esta temperatura. Todavia, os autores notaram que as emissões de NOx foram inferiores àquelas da gasolina para alguns valores de H_2 no etanol e razões de compressão. Desta forma, este trabalho mostrou que em certas condições de operação, esta mistura tem potencial para substituir a gasolina.

Da mesma forma, Yousufuddin *et al.* (2009) exploraram experimentalmente a variação de desempenho com conteúdo de hidrogênio por volume, taxas de compressão e tempo de ignição em rotação constante do motor. A BMEP e a eficiência térmica aumentaram com o conteúdo de hidrogênio para um determinado tempo de ignição. O tempo de ignição que maximizou a eficiência térmica e minimizou o BSFC foi o mesmo para todos os casos com adição H_2. De fato, os autores concluíram que a eficiência e o desempenho poderiam ser otimizados com o tempo de ignição em uma determinada carga. Assim, os autores confirmaram que a mistura etanol-hidrogênio é promissora para aplicações bicombustíveis.

Um estudo da adição de hidrogênio sob condições estequiométricas foi realizado em um motor a etanol operando em marcha lenta (WANG, Jinhua, HUANG, et al., 2010). Os autores observaram que a variação cíclica da pressão efetiva média indicada (*indicated mean effective pressure* - IMEP), as emissões de HC e CO decresceram à medida que foi adicionado hidrogênio. Esta tendência se mostrou verdadeira até valores do conteúdo de hidrogênio no ar de admissão próximos ao limite inferior de inflamabilidade do hidrogênio no ar (4% v/v de H_2 no ar). Para valores superiores a 4%, o sistema de controle híbrido do motor começa a atuar. Este sistema reduz a abertura da válvula de marcha lenta para manter a velocidade do motor constante. Como consequência, os gases residuais presos aumentam, assim como o COVimep, e as emissões de CO e HC. Este comportamento pode ser atribuído ao deslocamento do ar admitido devido à adição de hidrogênio para valores acima de seu limite de inflamabilidade inferior, e consequente perda de potência resultante da redução da eficiência volumétrica.

Wang *et al*. (2010) também incluíram uma análise do processo de combustão. Eles observaram que tanto o período de desenvolvimento da chama quanto o período de propagação da chama são reduzidos com frações de hidrogênio maiores. Por outro lado, a temperatura dos gases de exaustão, que indica as perdas de escape, é reduzida com a adição de hidrogênio. Os autores também observaram que houve uma redução nas perdas de calor para o refrigerante. Os maiores picos de temperatura no cilindro resultaram em um aumento na produção de NOx. Por fim, Wang et al. concluem que a adição de hidrogênio contribui para a redução das emissões de aldeídos. Esta redução pode ser atribuída à menor fração de etanol na mistura combustível e à combustão mais completa.

A perspectiva de adição de hidrogênio se torna ainda mais atraente quando se considera a produção embarcada de hidrogênio. A produção embarcada de hidrogênio já ocorre através dos sistemas de eletrólise a bordo, como o usado por de Almeida et al. (2015). Os autores usaram este sistema para produzir pequenas quantidades de hidrogênio em um motor flexfuel em marcha lenta e carga parcial. Este motor operou com etanol e gasolina e até 14% de excesso de ar. A adição de hidrogênio afetou positivamente BSFC e as emissões de CO, CO_2. Por outro lado, os autores observaram que a adição de hidrogênio pode afetar negativamente as emissões de NOx e hidrocarbonetos não queimados (unburned hydrocarbons – HC). Essas pequenas quantidades de H2 não foram suficientes para uma operação estável em regime com excesso de ar em condições de carga parcial.

Uma estratégia de controle da produção embarcada e fornecimento de hidrogênio foi proposta para um MCI operando com uma mistura de 10% de etanol e 90% de gasolina (MORALES, BOBADILLA, et al., 2017). Simulações preliminares indicaram que a economia de combustível poderia decrescer em até 23% se a fração de massa do hidrogênio não ultrapassasse um valor ótimo entre 6 e 7%. Esse valor foi determinado de modo a não diminuir a eficiência volumétrica. Os autores conduziram então testes experimentais usando esta metodologia de controle. Devido às limitações do equipamento, o motor funcionou sem carga. Todavia, os resultados mostraram que o enriquecimento com hidrogênio poderia reduzir o consumo de gasolina em 15%. Uma contribuição importante desses trabalhos foram as relações matemáticas do esquema de controle para adição de combustível. Essas relações não dependem do tamanho ou da carga do motor. Entretanto, são necessários um sensor de fluxo de massa de ar na admissão, e um sensor de oxigênio nos gases de escape.

De forma semelhante, Cervantes-Bobadilla *et al.* (2018) desenvolveram um controlador para a produção de gás hidrogênio para um motor de ignição por centelha a gasolina. Esse motor operou sem carga e com enriquecimento de hidrogênio. O sistema de produção de hidrogênio foi um sistema alcalino eletrolisador de água. Ao contrário de outros trabalhos em que a produção de hidrogênio é constante, o controlador deste trabalho visa controlar a produção de hidrogênio para atender às demandas do motor. Assim, os autores projetaram e implementaram controle preditivo de modelo (model predictive control - MPC) e controle derivativo integral proporcional (proportional integrative derivative - PID) em combinação com rede neural artificial para controlar a produção sob demanda de hidrogênio. Os autores notaram que a gasolina enriquecida com hidrogênio aumentou as eficiências térmica e de combustão em 4% e 0,6%, respectivamente, e a potência de saída em 0,545 kW. Esses ganhos foram obtidos sem modificações no motor, o que indica que a adição de hidrogênio, além da incorporação destes sistemas, pode melhorar as características de máquinas existentes.

Uma investigação empírica de misturas ultra pobres de hidrogênio e etanol foi realizada por Greenwood et al. (2014). Os parâmetros controlados foram o nível de enriquecimento de hidrogênio e a razão de equivalência. A razão de equivalência variou até o limite de operação pobre (lean operating limit - LOL) da mistura de combustível. As misturas que se aproximam deste limite são definidas como ultra pobres por estes autores.

Os autores observaram que dentre as emissões de NOx, as emissões de NO em particular diminuíram conforme a razão de equivalência se aproximava de LOL (GREENWOOD, ERICKSON, et al., 2014). Essas emissões correspondem à maior parte das emissões de NOx. Esse comportamento foi observado por Ayala (2006). Esta tendência ocorre devido às menores temperaturas de chama causadas pela diluição de carga. Em regimes ultra pobres, o mecanismo de formação de NO dominante não é mais o mecanismo de Zeldovich (1947). O mecanismo dominante passa a ser o mecanismo de Fenimore (1979). No entanto, os autores concluíram que mais investigações são necessárias para entender as emissões de NO em motores a etanol enriquecidos com hidrogênio operando neste regime.

Além disso, Greenwood *et al.* (2014) reportaram que emissões de HC diminuíram ligeiramente com o aumento da fração de hidrogênio. Embora o hidrogênio tenha estabilizado a combustão, ele não melhorou significativamente a combustão ou reduziu significativamente as emissões de HC. Por outro lado, o COVimep aumentou com a razão de equivalência e diminuiu com a maior fração de hidrogênio. Os autores notaram que a adição de hidrogênio não influenciou a potência desenvolvida. Por outro lado, o empobrecimento da mistura resultou em redução da potência desenvolvida no motor. Da mesma forma, a temperatura dos gases de exaustão não foi influenciada pela adição de hidrogênio. No entanto, quanto mais próxima a razão de equivalência estava do LOL, menor foi a temperatura dos gases de escape.

Finalmente, os autores concluíram que a variação da razão de equivalência foi mais eficaz em melhorar a eficiência térmica do que o enriquecimento de hidrogênio (GREENWOOD, ERICKSON, et al., 2014). Além disso, embora o hidrogênio promova maiores velocidades de chama, a queima inadequada de combustível é um fator mais decisivo na eficiência térmica em regimes de operação ultra pobres. Desta forma, estes resultados apresentam o potencial da aplicação combinada destas estratégias de adição de hidrogênio e misturas pobres em melhorar significativamente o desempenho e emissões de motores a etanol. A deficiência observada consiste nas possíveis perdas de potência, mas estas podem ser compensadas com a adoção de um sobrealimentador, além da adição de hidrogênio e empobrecimento da mistura.

Uma análise do desempenho de um motor de ignição por centelha operando com misturas de etanol e hidrogênio foi realizada em condições de borboleta totalmente aberta (wide open throttle - WOT) por Zhang et al. (2016). Este regime de operação visa reduzir

as perdas de bombeamento que ocorrem em cargas parciais. Assim, a carga do motor foi controlada pela razão de excesso de ar. No entanto, a faixa de inflamabilidade limitada do etanol dificulta a operação nessas condições. Portanto, os autores propuseram a adição de H2 para reduzir a variação cíclica do motor. A BMEP decresceu com o aumento do excesso de ar, indicando que o torque e a carga do motor podem de fato ser controlados com a razão de excesso de ar.

Uma pesquisa sobre as propriedades da chama da mistura etanol-ar quando combinada com hidrogênio foi apresentada por Li et al. (2012). Este estudo foi realizado em uma câmara de combustão de volume constante, simulando o comportamento ideal de adição de calor no ponto morto superior. Os autores testaram misturas de 0–100% de hidrogênio, e razões de equivalência de 0,6–1,6. A condição inicial testada foi 0,1 MPa e 110ºC. Os resultados mostraram que a velocidade de propagação da chama aumenta exponencialmente com a adição de hidrogênio. Esse comportamento ocorre devido à alta difusividade do hidrogênio, e é mais pronunciado quando a mistura é pobre. Assim, a adição de hidrogênio favorece a operação em regime pobre, reduzindo o fenômeno de *misfire* e contribuindo para a estabilidade da combustão.

O potencial de misturas de etanol e hidrogênio em regime pobre para uso em um motor de ignição por centelha foi avaliado para fins de extensão de autonomia (GARCÍA, MONSALVE-SERRANO, et al., 2020b). Este motor teve um sistema de ignição com pré-câmara de combustão (*pre-chamber ignition system* – PCIS) e operou com razão de excesso de ar igual a 1,4. Eles compararam os resultados de emissões e análise de ciclo-de-vida (*life cycle analysis* – LCA) de um veículo híbrido usando o motor PCIS, com os resultados de um veículo puramente elétrico e um veículo convencional a etanol com um MIF em regime estequiométrico. Os autores observaram que o motor PCIS operando como extensor de autonomia pode obter emissões ultrabaixas de CO_2 ¬com altas vazões de hidrogênio, mas pode acarretar o dobro do consumo em energia comparado ao caso base do veículo convencional a etanol. Por outro lado, a adição de hidrogênio em vazões menores no motor PCIS resulta em consumo de energia semelhante ao caso base, mas com menores emissões de CO_2. Ademais, as emissões de NOx decrescem até 7 vezes. Do ponto de vista de LCA, os autores concluíram que o motor com etanol e hidrogênio para uso como extensor de autonomia foi o mais sustentável.

Os autores verificaram que é possível usar este modo de combustão e mistura combustível em veículos leves e que o conceito de extensor de autonomia apresentou

desempenho aceitável (GARCÍA, MONSALVE-SERRANO, et al., 2020b). Nos ciclos de condução urbanos, este conceito foi muito competitivo, mas em estrada, os motores híbridos apresentaram desempenho um pouco pior que o caso base devido às perdas mecânicas e da bateria. Ainda assim, apesar da redução nas emissões de NOx e GEE, este modo de combustão ainda não está pronto para uso em larga escala. De qualquer forma, este trabalho confirma o potencial desta mistura em regime pobre para a aplicação de interesse deste trabalho que é o seu uso como extensor de autonomia. Porém, com base na revisão bibliográfica proposta, este trabalho propõe a adaptação de um motor existente com sobrealimentador, ao invés de um motor com PCIS, possibilitando melhorar o desempenho e emissões destas máquinas adaptadas.

ANÁLISE EXERGÉTICA DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA OPERANDO COM ADIÇÃO DE HIDROGÊNIO

Hidrogênio como combustível possui maior eficiência de segunda lei devido a sua maior compressibilidade, combustão mais eficiente e menor consumo específico (NIEMINEN, DINCER, 2010). Além disso, a combustão de hidrogênio apresenta menos irreversibilidades que a combustão de gasolina. Porém, um motor movido apenas a hidrogênio pode apresentar menor trabalho disponível que motores movidos a gasolina (NIEMINEN, DINCER, 2010). Por outro lado, quanto maior a quantidade de hidrogênio adicionada em misturas combustíveis, maior o potencial de realização de trabalho do motor (RAKOPOULOS, MICHOS, 2009, RAKOPOULOS, SCOTT, et al., 2008) e a eficiência de segunda lei em motores de ignição por centelha (OZCAN, 2010, SUN, LIU, et al., 2019).

Além disso, a adição de hidrogênio resulta em redução da produção de irreversibilidades durante a combustão. Isto ocorre, pois, a combustão de hidrogênio é uma reação entre duas moléculas relativamente simples que sintetizam uma mais complexa. Por outro lado, a combustão de outros combustíveis é uma reação de decomposição de moléculas mais complexas em outras mais simples (RAKOPOULOS, SCOTT, et al., 2008).

A adição de hidrogênio favorece regimes de operação pobre do ponto de vista da segunda lei. Esses benefícios são ainda mais pronunciados quando o avanço de ignição foi otimizado para o ponto de torque máximo (OZCAN, 2010). A proporção de

combustível que é usada durante a etapa de expansão para gerar trabalho aumenta com o conteúdo de hidrogênio devido à alta velocidade de queima do hidrogênio. Como consequência, a exergia nos gases de exaustão decresce. Por outro lado, a menor distância de extinção do hidrogênio aumenta a exergia devido ao resfriamento do motor (SUN, LIU, et al., 2019, WANG, Xi, SUN, et al., 2019). O uso de sobrealimentação tem alto potencial de recuperação de exergia em motores de combustão interna operando com hidrogênio (WANG, Xi, SUN, et al., 2019).

DESAFIOS E BENEFÍCIOS

Com base na discussão apresentada e nas tendências verificadas da adição de hidrogênio, é possível sumarizar as conclusões da literatura sobre a adição de hidrogênio. Os maiores desafios e benefícios do uso de hidrogênio em MCI são apresentados na Tabela 2.1 e serão discutidos a seguir. No que diz respeito a seu uso como combustível suplementar, é possível operar em três regimes principais: (i) Aumento da razão ar/combustível para um percentual de adição de H2 constante; (ii) Aumento do percentual de adição de H_2 para uma razão de equivalência constante; e (iii) Regime de combustão ultra pobre (próximo do limite de operação inferior – LOI – com adição de H_2). O caso (iii) corresponde ao limite de empobrecimento do caso (i) para um dado percentual de hidrogênio. As tendências esperadas de cada um destes modos de operação são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 Desafios e benefícios associados ao uso de hidrogênio em MCI.

Propriedade	Benefícios	Desafios
Ampla faixa de inflamabilidade	Combustão em regimes pobres ou diluídos	Redução de potência
Baixa energia de autoignição	Fácil ignição em regimes de mistura pobre	Risco de ignição prematura
Pequena distância de extinção	Chama se propaga próxima às paredes Menores perdas de calor	Ocorrência de *flashback*
Alta temperatura de chama	Operação com maiores razões de compressão	Dificulta a ignição por compressão

Alta difusividade	Mistura ar/combustível mais homogênea	Ocorrência de vazamentos
Alta velocidade de chama	Aproximação do ciclo Otto ideal	-
Alta octanagem	Operação com maiores razões de compressão Reduz detonação e variação da IMEP	Dificulta ignição por compressão
Baixa densidade	-	Baixa densidade energética por volume

Fonte: Adaptado de (JORDAN, 2012).

Tabela 2.2 Tendências esperadas para diferentes condições de operação usando hidrogênio como combustível suplementar.

	Aumento da razão ar/combustível para um percentual de adição de H_2 constante	Aumento do percentual de adição de H_2 para uma razão de equivalência constante	Regime de combustão pobre (próximo do LOI com adição de H_2)
NOx	Diminui	Aumenta	Diminui
Duração de Queima	Aumenta	Diminui	Depende das condições de operação
Emissões de HC/CO	Diminui até próximo do LOI	Leve redução	Depende da definição de LOI
Eficiência	Aumenta, então diminui próximo do LOI	Leve aumento	Leve Aumento
COV	Aumenta	Diminui	Depende da definição de LOI
Potência	Diminui	Depende da estratégia de adição de H_2 e condições de operação	Diminui
Temperatura dos gases de Exaustão	Diminui	Aumenta	Diminui

Fonte: Adaptado de (JORDAN, 2012).

CONCLUSÕES

Portanto, concluí-se que a adição de hidrogênio pode suplementar as deficiências do etanol em motores de ignição por centelha que podem ser usados em veículos híbridos para redução das emissões do setor de transporte a curto e médio prazo. Estes sistemas podem ser altamente beneficiados da adição de hidrogênio, operação em regime pobre e adoção de sobrealimentação, que tornam a adoção de motores de ignição por centelha a etanol uma alternativa mais sustentável para a geração de eletricidade e mobilidade híbrida. Trabalhos futuros devem explorar a viabilidade técnico-econômica destes sistemas e analisar outras considerações como o transporte e armazenamento de hidrogênio para estes sistemas.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi realizada com o apoio do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - PRH/ANP suportado com recursos proveniente do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P.D&I da Resolução ANP nº 50/2015.

BIBLIOGRAFIA

ABUSOGLU, A., KANOGLU, M. *"Exergetic and thermoeconomic analyses of diesel engine powered cogeneration: Part 2 – Application"*, Applied Thermal Engineering, v. 29, n. 2, p. 242–249, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.02.026. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943110800104X.

AGHBASHLO, M., TABATABAEI, M., KHALIFE, E., et al. *"Exergoeconomic analysis of a DI diesel engine fueled with diesel/biodiesel (B5) emulsions containing aqueous nano cerium oxide"*, Energy, v. 149, n. x, p. 967–978, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.02.082. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.082.

AGHBASHLO, M., TABATABAEI, M., MOHAMMADI, P., et al. "*Neat diesel beats waste-oriented biodiesel from the exergoeconomic and exergoenvironmental point of views"*, Energy Conversion and Management, v. 148, p. 1–15, 2017. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.05.048. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.048.

AL-BAGHDADI, M. A. S. S. *"Hydrogen--ethanol blending as an alternative fuel of spark ignition engines"*, Renewable Energy, v. 28, n. 9, p. 1471–1478, 2003. DOI: 10.1016/S0960-1481(02)00188-X.

ANDREÃO, W. L., PINTO, J. A., PEDRUZZI, R., et al. *"Quantifying the impact of particle matter on mortality and hospitalizations in four Brazilian metropolitan areas"*, Journal of

Environmental Management, v. 270, p. 110840, set. 2020. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110840. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479720307714.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA, *A. Eficiência energética sustentável* 2017. . [S.l: s.n.], 2017.

AYAD, Sami M.M.E., BELCHIOR, C. R. P., DA SILVA, G. L. R., et al. *"Analysis of performance parameters of an ethanol fueled spark ignition engine operating with hydrogen enrichment"*, International Journal of Hydrogen Energy, v. 45, n. 8, 2020. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.151.

AYAD, Sami Massalami Mohammed Elmassalami, VAGO, C. L., BELCHIOR, C. R. P., et al. *"Cylinder pressure based calibration model for engines using ethanol, hydrogen and natural gas as alternative fuels"*, Energy Reports, n. To be Published, jul. 2021. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.06.015. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352484721003772.

AYALA, F. A. *Combustion lean limits fundamentals and their application to a SI hydrogen-enhanced engine concept. 2006*. Massachusetts Institute of Technology, 2006.

BALDI, F., JOHNSON, H., GABRIELII, C., et al. *"Energy and exergy analysis of ship energy systems - The case study of a chemical tanker"*, Proceedings of the 27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2014, v. 18, n. 2, p. 82–93, 2014. DOI: 10.5541/ijot.70299.

BURNHAM, A., GOHLKE, D., RUSH, L., et al. *Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains*. . [S.l.], Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States), 2021.

BYERS, E. A., GASPARATOS, A., SERRENHO, A. C. "*A framework for the exergy analysis of future transport pathways: Application for the United Kingdom transport system 2010-2050"*, Energy, v. 88, p. 849–862, 2015. DOI: 10.1016/j.energy.2015.07.021.

CALISKAN, H., MORI, K. "*Thermodynamic, environmental and economic effects of diesel and biodiesel fuels on exhaust emissions and nano-particles of a diesel engine"*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 56, p. 203–221, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.08.009. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920916306071.

CARBOT-ROJAS, D. A., ESCOBAR-JIMÉNEZ, R. F., GÓMEZ-AGUILAR, J. F., et al. *"A survey on modeling , biofuels , control and supervision systems applied in internal combustion engines"*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 73, n. February, p. 1070–1085, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.168. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.168.

CASA CIVIL DA PRESIDÊNCIA DO BRASIL. "*Law 13.576, from december 26th*, 2017".
CASA CIVIL DA PRESIDÊNCIA DO BRASIL. "*Law 13.755, from December 10th, 2018*".

CAVALCANTI, Eduardo J C, CARVALHO, M., OCHOA, A. A. V. *"Exergoeconomic and exergoenvironmental comparison of diesel-biodiesel blends in a direct injection engine at variable loads*", Energy Conversion and Management, v. 183, p. 450–461, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.113. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419300342.

CAVALCANTI, Eduardo José Cidade. *"Exergy, exergoeconomic and environmental analysis of diesel engine operating with EGR rate*", International Journal of Exergy, v. 29, n. 1, p. 22–42, 2019.

CERVANTES-BOBADILLA, M., ESCOBAR-JIMÉNEZ, R. F., GÓMEZ-AGUILAR, J. F., et al. *"Experimental study on the performance of controllers for the hydrogen gas production demanded by an internal combustion engine"*, Energies, 2018. DOI: 10.3390/en11082157.

DE ALMEIDA, L. Q., SALES, L. C. M., SODRÉ, J. R. "*Fuel consumption and emissions from a vehicle operating with ethanol, gasoline and hydrogen produced on-board*", International Journal of Hydrogen Energy, v. 40, n. 21, p. 6988–6994, 2015. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.03.167.

DOGAN, B., CAKMAK, A., KADIR YESILYURT, M., et al. *"Investigation on 1-heptanol as an oxygenated additive with diesel fuel for compression-ignition engine applications: An approach in terms of energy, exergy, exergoeconomic, enviroeconomic, and sustainability analyses"*, Fuel, v. 275, p. 117973, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117973. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120309698.

ELSEMARY, I. M. M. M., ATTIA, A. A. A. A., ELNAGAR, K. H., et al. *"Experimental investigation on performance of single cylinder spark ignition engine fueled with hydrogen-gasoline mixture"*, Applied Thermal Engineering, v. 106, p. 850–854, 2016. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.05.177. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.177.

FENIMORE, C. P. "*Studies of fuel-nitrogen species in rich flame gases"*. 17, 1979. Anais [...] [S.l.], Elsevier, 1979. p. 661–670.

GARCÍA, A., MONSALVE-SERRANO, J., MARTÍNEZ-BOGGIO, S., et al. *"Potential of bio-ethanol in different advanced combustion modes for hybrid passenger vehicles"*, Renewable Energy, v. 150, p. 58–77, 2020a. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.102. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119319743.

GARCÍA, A., MONSALVE-SERRANO, J., MARTÍNEZ-BOGGIO, S., et al. *"Potential of bio-ethanol in different advanced combustion modes for hybrid passenger vehicles"*, Renewable Energy, v. 150, p. 58–77, 2020b. DOI: 10.1016/j.renene.2019.12.102.

GOZMEN SANLI, B., ÖZCANLI, M., SERIN, H. *"Assessment of thermodynamic performance of an IC engine using microalgae biodiesel at various ambient temperatures"*, Fuel, v. 277, p. 118108, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118108. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120311042.

GREENWOOD, J. B., ERICKSON, P. A., HWANG, J., et al. *"Experimental results of hydrogen enrichment of ethanol in an ultra-lean internal combustion engine"*, International Journal of Hydrogen Energy, v. 39, n. 24, p. 12980–12990, 2014. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.06.030. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.030.

HERRERA, M. D. M., ARRIETA, F. R. P., SODRÉ, J. R. *"Thermoeconomic assessment of an absorption refrigeration and hydrogen-fueled diesel power generator cogeneration system"*, International Journal of Hydrogen Energy, v. 39, n. 9, p. 4590–4599, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.028. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319914000779.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2020*. [S.l.], OECD, 2020. Disponível em: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2020_557a761b-en. (World Energy Outlook).

JABER, J. O., AL-GHANDOOR, A., SAWALHA, S. A. *"Energy analysis and exergy utilization in the transportation sector of Jordan"*, Energy Policy, v. 36, n. 8, p. 2995–3000, 2008. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.04.004.

JALIL-VEGA, F., GARCÍA KERDAN, I., HAWKES, A. D. "*Spatially-resolved urban energy systems model to study decarbonisation pathways for energy services in cities*", Applied Energy, v. 262, n. February, p. 114445, 2020. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114445.

JI, C., ZHANG, B., WANG, S. *"Enhancing the performance of a spark-ignition methanol engine with hydrogen addition"*, International Journal of Hydrogen Energy, v. 38, n. 18, p. 7490–7498, 2013. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.04.001. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.04.001.

JORDAN, E. A. *Hydrogen Enrichment in Internal Combustion Engines: An Investigation of Performance and Emissions using Hydrogen-Ethanol Bi-fueling. 2012*. University of California, Davis, 2012.

KARAGOZ, M., UYSAL, C., AGBULUT, U., et al. *"Exergetic and exergoeconomic analyses of a CI engine fueled with diesel-biodiesel blends containing various metal-oxide nanoparticles*", Energy, Energy. v. 214, n. C, 2021. DOI: DOI: 10.1016/j.energy.2020.118. Disponível em: https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v214y2021ics036054422031937x.html.

KARAGÖZ, Y., SANDALC\I, T., DALK\IL\IÇ, A. S. "*Effects of hydrogen and oxygen enrichment on performance and emissions of an SI engine under idle operating condition*", international journal of hydrogen energy, v. 40, n. 28, p. 8607–8619, 2015.

KAYA, C., AYDIN, Z., KÖKKÜLÜNK, G., et al. "*Exergetic and exergoeconomic analyzes of compressed natural gas as an alternative fuel for a diesel engine"*, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, Cited By :3Export Date: 16 May 2021, 2020. DOI: 10.1080/15567036.2020.1811429. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85090214495&doi=10.1080%2F15567036.2020.1811429&partnerID=40&md5=54f6f8a23811ef92f0b76b34e9319e4b.

KHALILARYA, S., MOHAMMADKHANI, F., SEYYEDVALILU, M. H. *"A Parametric Study on Exergy and Exergoeconomic Analysis of a Diesel Engine based Combined Heat and Power System"*, International Journal of Engineering, v. 28, n. 4, p. 608–617, 2015. Disponível em: http://www.ije.ir/article_72496.html.

KHALILARYA, S., NEMATI, A., OTHERS. *"A numerical investigation on the influence of EGR in a supercharged SI engine fueled with gasoline and alternative fuels*", Energy Conversion and Management, v. 83, p. 260–269, 2014.

KIM, J., CHUN, K. M., SONG, S., et al. *"The effects of hydrogen on the combustion, performance and emissions of a turbo gasoline direct-injection engine with exhaust gas recirculation"*, International Journal of Hydrogen Energy, v. 42, n. 39, p. 25074–25087, 2017.

LI, G., ZHANG, Z., LIANG, J., et al. "*Effects of hydrogen addition on the premixed laminar-flames of ethanol--air gaseous mixtures: an experimental study*", international journal of

hydrogen energy, v. 37, n. 5, p. 4490–4501, 2012. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.11.126. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.126.

MA, F., DING, S., WANG, Y., et al. *Study on combustion behaviors and cycle-by-cycle variations in a turbocharged lean burn natural gas S.I. engine with hydrogen enrichment*. International Journal of Hydrogen Energy. [S.l: s.n.]. , 2008.

MARTÍNEZ-BOGGIO, S. D., CURTO-RISSO, P. L., MEDINA, A., et al. "*Simulation of cycle-to-cycle variations on spark ignition engines fueled with gasoline-hydrogen blends*", International Journal of Hydrogen Energy, v. 41, n. 21, p. 9087–9099, 2016. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.120.

MERT, S. O., DINCER, I., OZCELIK, Z. "*Exergoeconomic analysis of a vehicular PEM fuel cell system*", Journal of Power Sources, v. 165, n. 1, p. 244–252, 2007. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.12.002.

MORALES, J. G., BOBADILLA, M. C., ESCOBAR-JIMÉNEZ, R. F., et al. "*Control scheme formulation for the production of hydrogen on demand to feed an internal combustion engine"*, Sustainability (Switzerland), v. 9, n. 1, 2017. DOI: 10.3390/su9010007.

NIEMINEN, J., DINCER, I. *"Comparative exergy analyses of gasoline and hydrogen fuelled ICEs"*, International Journal of Hydrogen Energy, v. 35, n. 10, p. 5124–5132, 2010. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.09.003. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.003.

NIU, R., YU, X., DU, Y., et al. *"Effect of hydrogen proportion on lean burn performance of a dual fuel SI engine using hydrogen direct-injection*", Fuel, v. 186, p. 792–799, 2016. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.09.021. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.09.021.

OZCAN, H. *"Hydrogen enrichment effects on the second law analysis of a lean burn natural gas engine"*, International Journal of Hydrogen Energy, v. 35, n. 3, p. 1443–1452, 2010. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.039. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.039.

PARK, J., SONG, S. *"Predicting the performance and NOx emissions of a turbocharged spark-ignition engine generator fueled with biogases and hydrogen addition under down-boosting condition*". 39, 2014. Anais [...] [S.l: s.n.], 2014. p. 8510–8524. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.150.

PONCE ARRIETA, F. R., SODRÉ, J. R., MATEUS HERRERA, M. D., et al. *"Exergoeconomic analysis of an absorption refrigeration and natural gas-fueled diesel power generator cogeneration system"*, Journal of Natural Gas Science and Engineering, v. 36, p. 155–164, 2016. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.10.022.

RAKOPOULOS, C. D., MICHOS, C. N. *"Generation of combustion irreversibilities in a spark ignition engine under biogas-hydrogen mixtures fueling"*, International Journal of Hydrogen Energy, v. 34, n. 10, p. 4422–4437, 2009. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.02.087.

RAKOPOULOS, C. D., SCOTT, M. A., KYRITSIS, D. C., et al. *"Availability analysis of hydrogen/natural gas blends combustion in internal combustion engines*", Energy, v. 33, n. 2, p. 248–255, 2008. DOI: 10.1016/j.energy.2007.05.009.

RAVI, K., MATHEW, S., BHASKER, J. P., et al. *"Gaseous alternative fuels for Spark Ignition Engines-A technical review"*, Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences, v. 10, n. 1, p. 93–99, 2017. Disponível em: www.jchps.com.

ROCHA, H. M. Z., PEREIRA, R. da S., NOGUEIRA, M. F. M., et al. *"Experimental investigation of hydrogen addition in the intake air of compressed ignition engines running on biodiesel blend"*, International Journal of Hydrogen Energy, v. 42, n. 7, p. 4530–4539, fev. 2017. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.032. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319916333249.

SUN, P., LIU, Z., YU, X., et al. *"Experimental study on heat and exergy balance of a dual-fuel combined injection engine with hydrogen and gasoline*", International Journal of Hydrogen Energy, v. 44, n. 39, p. 22301–22315, ago. 2019. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.06.149. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.149.

VALERO, A., VALERO, A., CALVO, G., et al. "*Global material requirements for the energy transition. An exergy flow analysis of decarbonisation pathways*", Energy, v. 159, p. 1175–1184, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.06.149.

WANG, J., HUANG, Z., TANG, C., et al. "*Effect of hydrogen addition on early flame growth of lean burn natural gas--air mixtures*", international journal of hydrogen energy, v. 35, n. 13, p. 7246–7252, 2010.

WANG, X., SUN, B. gang, LUO, Q. he. *"Energy and exergy analysis of a turbocharged hydrogen internal combustion engine"*, International Journal of Hydrogen Energy, v. 44, n. 11, p. 5551–5563, 2019. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.10.047. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.047.

WU, H., YU, X., DU, Y., et al. *"Study on cold start characteristics of dual fuel SI engine with hydrogen direct-injection"*, Applied Thermal Engineering, 2016. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.097.

YOUSUFUDDIN, S., MASOOD, M. *"Effect of ignition timing and compression ratio on the performance of a hydrogen-ethanol fuelled engine"*, International Journal of Hydrogen Energy, v. 34, n. 16, p. 6945–6950, 2009. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.05.122. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.122.

YU, X., WU, H., DU, Y., et al. *"Research on cycle-by-cycle variations of an SI engine with hydrogen direct injection under lean burn conditions"*, Applied Thermal Engineering, v. 109, p. 569–581, 2016. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.077. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.077.

ZELDOVICH, Y. B., SADOVNIKOV, P. Y., FRANK-KAMENETSKII, D. A. *"Oxidation of Nitrogen in Combustion, translation by M"*, Shelef, Academy of Sciences of USSR, Institute of Chemical Physics, Moscow-Leningrad, 1947.

ZHANG, B., JI, C., WANG, S. *"Performance of a hydrogen-enriched ethanol engine at unthrottled and lean conditions"*, Energy Conversion and Management, v. 114, p. 68–74, 2016.

Recebido em: 10/09/2022

Aceito em: 24/10/2022