

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UMA CÉLULA ELETROLÍTICA PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO (GÁS HHO) COM TESTE EM GRUPO GERADOR DIESEL.

Ricardo da Silva Pereira, rspereira@ufpa.br^{1,2}

Hendrick Máxil Zarate Rocha, henzaro@gmail.com¹

Manoel F. Martins Nogueira, mfmn@ufpa.br¹

Danielle Regina da S. Guerra, daguerra@ufpa.br¹

Sara Pacheco Leão, sarapacheco40@gmail.com¹

¹Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Correa 01. CEP. 66075-110. Bairro Guamá, Belém (PA)

²Faculdade Estácio de Belém., Av. Governador José Malcher, sn. Belém (PA)

Resumo: Existe pouca evidência experimental sólida no que refere a utilização do hidrogênio formado por eletrólises da água (HHO) em motores de combustão interna misturando o mesmo com o ar de admissão. Este trabalho objetiva realizar testes experimentais em grupo gerador diesel consumindo combustível B7 com injeção de gás HHO no ar de admissão. Os parâmetros de consumo específico de combustível, emissões dos gases de escape e temperatura dos gases foram avaliados. Os resultados experimentais mostram que houve redução do consumo específico de combustível e aumento da temperatura dos gases de escape e das emissões de NOx. A corrente elétrica de alimentação da célula eletrolítica foi um parâmetro utilizado para variar a quantidade de gás produzido pela célula.

Palavras-chave: eletrolise da água, gás HHO, grupo gerador e motor diesel.

1. INTRODUÇÃO

As questões que envolvem a produção e utilização de combustíveis fosseis ou renováveis tem sido objeto de estudo em muitos centros de pesquisa no Brasil e no mundo. Dentre as formas de combustíveis alternativos tem-se o biodiesel, etanol, hidrogênio, óleos vegetais, ou misturas desses com diesel mineral.

A ideia principal gira em torno de tentar substituir o óleo diesel por combustíveis que sejam biodegradáveis, não tóxicos, de fácil produção e renováveis na natureza (Pereira, 2011). Outro ponto importante é realizar estudos que possam melhorar a eficiência dos processos de combustão nesses motores diesel, reduzindo emissões e consumo de combustível.

Abordando alternativas que visam melhorar a eficiência do processo de combustão, trabalhos utilizando adição de gás hidrogênio no ar de admissão de motores tem apresentado resultados excelentes (Rocha, 2016). No geral são utilizados hidrogênio comercial, com grau de pureza em torno de 99,99%.

Pesquisas estão sendo realizadas na utilização de gás hidrogênio como combustível auxiliar para melhor o processo de combustão em MCI. Essas soluções versam por unir as características do gás hidrogênio ao motor de combustão interna. Isso se torna viável mediante a observação de algumas características físico-química do hidrogênio, entre elas a rápida combustão e elevado o PCI que é em torno de 119,972 MJ/kg, (Moraes, 2013) e Sandalc e Karagöz (2014).

Apesar de ser o elemento mais abundante no universo, o hidrogênio precisa ser produzido a partir de outras fontes de energia. Existem diversas rotas para produção de hidrogênio, que incluem ciclos termoquímicos, reforma de combustíveis orgânicos como o gás natural, álcool, biomassa, entre outros, e a eletrólise da água.

2. USO DE HIDROGÊNIO EM MOTORES CONSUMINDO ÓLEO DIESEL

As questões que envolvem a produção e utilização de combustíveis fosseis ou renováveis tem sido objeto de estudo em muitos centros de pesquisa do Brasil e do mundo. Dentre as alternativas de combustíveis alternativos tem-se o biodiesel, etanol, óleos vegetais, ou misturas desses com diesel mineral. Outras alternativas visam melhorar a eficiência do processo de combustão utilizando para isso a adição de gás hidrogênio no ar de admissão de motores (Rocha, 2016)

A busca por aumento de eficiência e desempenho em motores de ignição por compressão, tem levado pesquisadores a desenvolver diversas metodologias para alcançar esses objetivos. Entre elas está o uso de hidrogênio como combustível auxiliar para melhorar o processo de combustão. O hidrogênio é um combustível limpo, renovável e reciclável e seu uso como combustível permite reduzir as emissões de gases poluidores por não conter carbono em sua

composição (o produto da combustão é vapor d'água), melhorando substancialmente a qualidade do ar (Karagöz et al., 2016).

A forma como se injeta o gás hidrogênio influencia no processo de combustão. Neste trabalho utilizou-se o método de injeção contínua de hidrogênio no coletor de ar de admissão do motor, por ser o mais simples de ser implementado. Porém ao utilizá-lo, é indispensável o uso de dispositivos corta chama, que evitam risco de explosão caso aconteça o retorno da chama (backfire). De acordo com Hamdan et al., (2015) esse método contribui para a redução da eficiência volumétrica do motor.

No trabalho apresentado por Deb et al, 2015, mostrou-se que as emissões de dióxido de carbono, monóxido de carbono e hidrocarbonetos não queimados foram reduzidas, assim como o consumo específico de combustível. As emissões de NOx cresceram em função do aumento da temperatura, provocada pela aceleração da combustão durante a queima do hidrogênio.

Karagöz et al (2016), encontraram reduções nas emissões de CO, CO₂ e HC e aumento nas emissões de NOx, ao utilizarem testes com a injeção de gás hidrogênio em um motor de combustão interna. Os resultados mostraram que houve aumento do consumo específico de combustível, fato que foi associado à redução da eficiência volumétrica do motor, causada pela injeção do hidrogênio no coletor de admissão de ar.

2.1. Experiências realizadas utilizando gás HHO em motores de Combustão Interna.

Entre os trabalhos que utilizaram e queimaram o hidrogênio contido no gás HHO, produzido pelo processo de eletrolise da água para melhorar o desempenho dos motores, tem-se o desenvolvido por Musmar e Al-Rousan (2011). Eles desenvolveram um sistema de geração de gás HHO produzido por duas células que foi conectado diretamente ao motor. Obtiveram como resultado o aumento na eficiência térmica em cerca de 3% para a célula B e de 8% para a célula C. Houve também redução do consumo específico de combustível.

No trabalho realizado por Rajaram et al. (2014), foi verificada a influência da adição de oxigênio enriquecido com gás HHO num motor diesel de injeção direta. Os principais parâmetros analisados foram: a eficiência térmica ao freio e emissões. Os resultados mostraram que introduzindo o gás HHO, a eficiência térmica ao freio do motor teve aumento de 11,06%, o monóxido de carbono diminuiu 15,38%, os hidrocarbonetos não queimados diminuíram em 18,18% e o dióxido de carbono aumentou em 6,06%.

Em sua pesquisa, Sur et al. (2014) verificou as mudanças na utilização do gás HHO em um motor monocilíndrico a gasolina de 5.4kw, rotação de 8000 rpm e taxa de compressão 8,8:1. Os resultados mostraram que houve redução no consumo específico de combustível. Além disso, verificou-se também a redução nas emissões de CO, caracterizando maior eficiência na combustão.

3. APARATO EXPERIMENTAL

Para a realização dos testes utilizando o kit HHO e o combustível B7 foi montada uma bancada composta por um grupo gerador diesel, instrumentos de medição (termopares, balança digital, anemômetro, analisadores de gases e medidor de grandezas elétricas) e sistema de aquisição de dados. Para cada ensaio foram avaliados os seguintes parâmetros: vazão volumétrica e mássica de combustível, potência elétrica, emissões dos gases de escape e temperatura dos gases de escape.

Para a realização dos testes utilizou-se um grupo gerador com motor monocilíndrico da marca BRANCO BD-6500 CF3E de quatro tempos, resfriado a ar e injeção direta de combustível. O gerador foi ligado a um banco de resistências de 5kW que é utilizado para variar a carga elétrica. Para os testes, utilizou-se uma potência de 60% da carga nominal do grupo gerador. As grandezas elétricas foram monitoradas utilizando o equipamento SAGA 4500, que mede corrente elétrica, potência ativa e reativa, fator de potência e tensão elétrica.

Para o monitoramento da vazão mássica de combustível consumida pelo motor utilizou-se uma balança digital de precisão. De posse das informações da vazão mássica de combustível e da potência elétrica gerada, calculou-se o consumo específico de combustível (C_{spc}) como mostra a equação 1.

$$C_{spc} = \frac{\dot{m}_{B7}}{P_{ele}} \quad (1)$$

O monitoramento da temperatura em diversos pontos do grupo gerador foi realizado através de termopares tipo K. E para a medição dos gases de exaustão foi utilizado o analisador de gases Greeline 8000. Com ele é possível medir as emissões de CO, CO₂, O₂, NO₂, NO e HC. A vazão mássica de gás HHO produzido pela célula de hidrogênio foi medida utilizando um rotâmetro da marca Omega. Já para a vazão mássica de ar do motor utilizou-se um anemômetro tipo turbina instalado em um mangote que foi conectado ao air box (câmara de expansão) instalado na tubulação de admissão.

Para a aquisição e tratamento dos dados encaminhados pelo aquisitor de dados foi necessária a criação de uma ferramenta computacional de supervisão e controle, desenvolvida com a ajuda do programa DAQFactory Pro. V16.2.

3.1. Metodologia Experimental dos testes

Inicialmente foi realizado um teste no grupo gerador operando apenas com B7. Em seguida, foram realizadas medições na vazão mássica de combustível, temperaturas, emissões e potência elétrica, para se gerar uma linha base que servirá de comparação para os resultados obtidos com a injeção de gás HHO. A Figura 1 apresenta um esquema da bancada experimental, localizada no Laboratório de Motores, na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará, local onde os ensaios foram realizados.

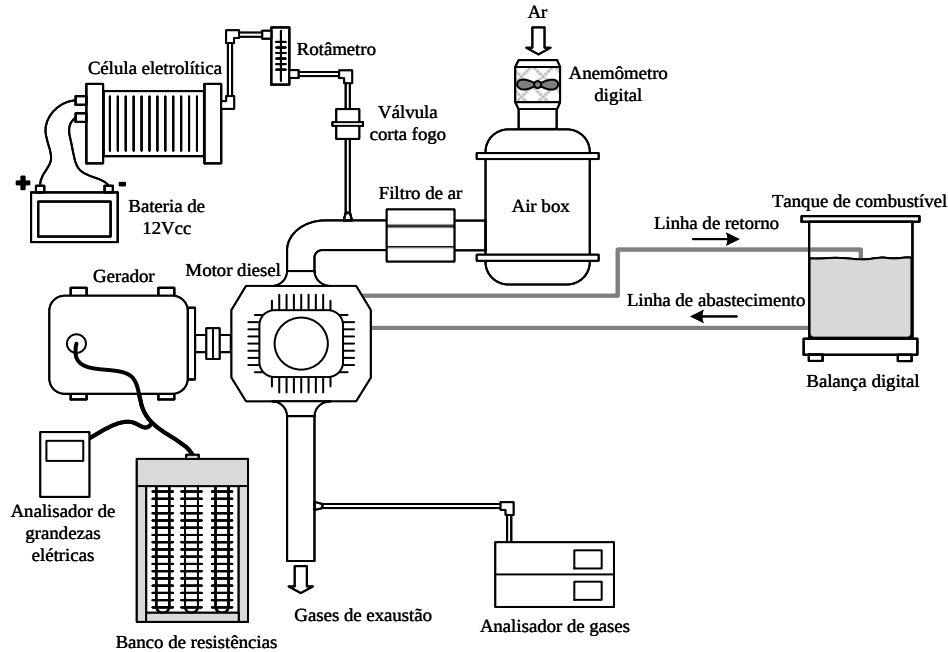


Figura 1. Esquema da bancada experimental dos testes.

Ligada a célula, através do controlador de corrente pode-se variar os valores de corrente de alimentação da célula, de 10A, 20A, 25A e 30A.

A análise dos parâmetros de funcionamento do motor foi realizada com base na corrente de alimentação da célula. O ideal seria realizar uma análise do gás com o uso de um cromatógrafo, entretanto não dispomos de tal equipamento.

O gás HHO foi injetado no ar de admissão do motor, ao passo que eram coletadas as informações referentes ao consumo de combustível, potência elétrica, emissões e temperatura dos gases, para serem comparadas com a linha base do motor operando apenas com B7.

Para todos os testes realizados no grupo gerador, foi utilizada uma carga de 60% da potência nominal (2,43 kW) a uma rotação de 3600 rpm. De forma a garantir a confiabilidade dos testes, os ensaios no grupo gerador foram repetidos três vezes para cada quantidade de gás HHO injetado, utilizando diesel B7.

A incerteza foi calculada aplicando o mesmo método usado por DEB, SASTRY (2015) e os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Incerteza médias dos parâmetros medidos e calculados

Parâmetros	Incertezas
Potência elétrica	$\pm 1,00\%$
Variação da massa de combustível	$\pm 1,30\%$
NOx	$\pm 1,08\%$
Temperatura dos gases	$\pm 0,40\%$
Vazão mássica de B7	$\pm 1,39\%$
Consumo específico de combustível	$\pm 1,92\%$

4. RESULTADOS

Um ponto importante para o desenvolvimento do projeto foi identificar as propriedades físico-químicas do óleo diesel B7. Na Tabela 2, apresentam-se as principais propriedades do B7 e do H₂. As análises experimentais desses combustíveis foram realizadas pelo Laboratório de Caracterização de Combustíveis (LacBio), da Universidade Federal do Pará.

Tabela 2. Propriedades do combustível B7 e gás H₂

Propriedades	B7	Hidrogênio
Formula Química	$C_{6,95}H_{14,79}O_{0,05}S_{0,03}$	H ₂
Densidade a 20°C [kg/m³]	872.7	0,082
Viscosidade a 40°C [cSt]	2.9	-
PCS [MJ/kg]	44.0	141,80
PCI [MJ/kg]	41.7	119,97
Análise Elementar		
C [%]	83.43	
H [%]	14.91	99,99
O [%]	0.79	
N [%]	0.00	
S [%]	0.84	

Fonte: Lacbio - UFPA

Os valores obtidos do consumo específico de combustível foram de 455.4 g/kW-h quando usado somente B7 e 437,3, 428,4, 420,2 e 410,6 g/kW-h respectivamente para os quatro valores de corrente elétrica. Neste estudo, como apresentado na figura 2, o consumo específico de combustível foi favoravelmente afetado com o aumento da corrente elétrica, promovendo reduções de 3,97%, 5,92%, 7,72% e 9,83% respectivamente. Resultados semelhantes em relação ao consumo específico foram encontrados nos estudos de HAMDAN, SELIM (2015) e DEB, SASTRY (2015).

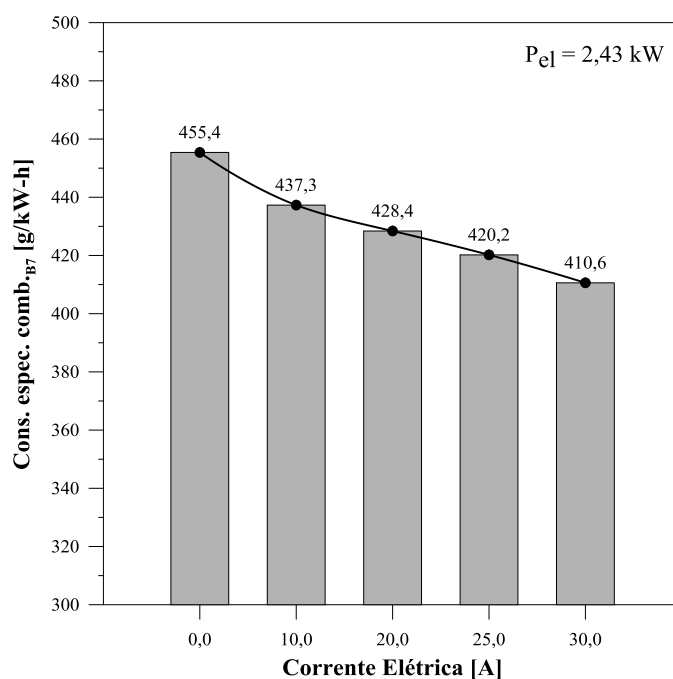
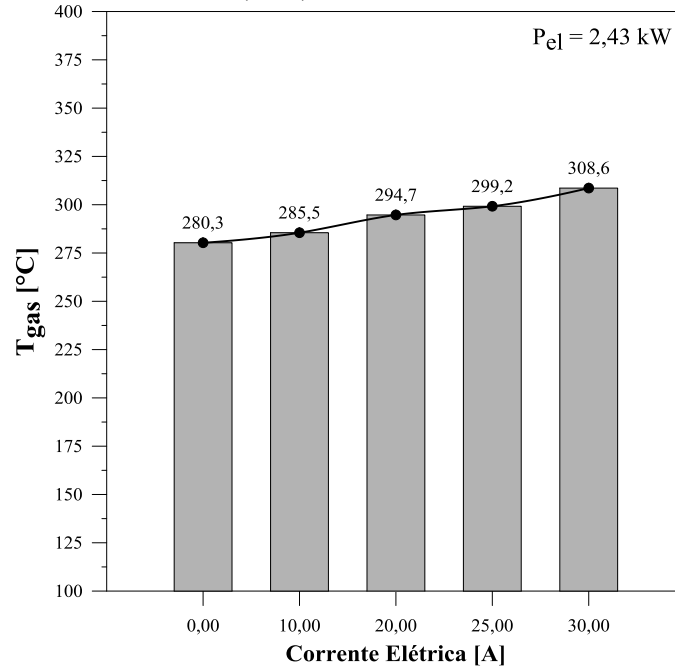


Figura 2. Consumo específico de combustível em função da corrente elétrica.

Como esperado, o aumento da corrente elétrica provocou aumento na produção de gás HHO, consequentemente da quantidade de gás hidrogênio, o que reflete no aumento da temperatura média do gás no cilindro, ocasionando aumento da temperatura dos gases de escape. Comparadas ao B7 puro as temperaturas cresceram em torno de 1,85, 5,13, 6,77 e

10,09% respectivamente (figura 3). Esses resultados encontrados são compatíveis aos identificados nos trabalhos de HAMDAN, SELIM (2015) e MORSY, EL-LEATHY (2015).



Fonte: autoria própria.

Figura 3. Temperatura dos gases de escape em função da corrente elétrica.

A figura 4 apresenta que para as variações de 10, 20, 25 e 30A de corrente, as emissões de óxidos de nitrogênio aumentaram 5,37, 7,83, 10,48 e 15,26% respectivamente. Os resultados encontrados são similares aos relatados por DEB, SASTRY (2015), JHANG, CHEN (2016) e CHIRIAC e APOSTOLESCU (2013).

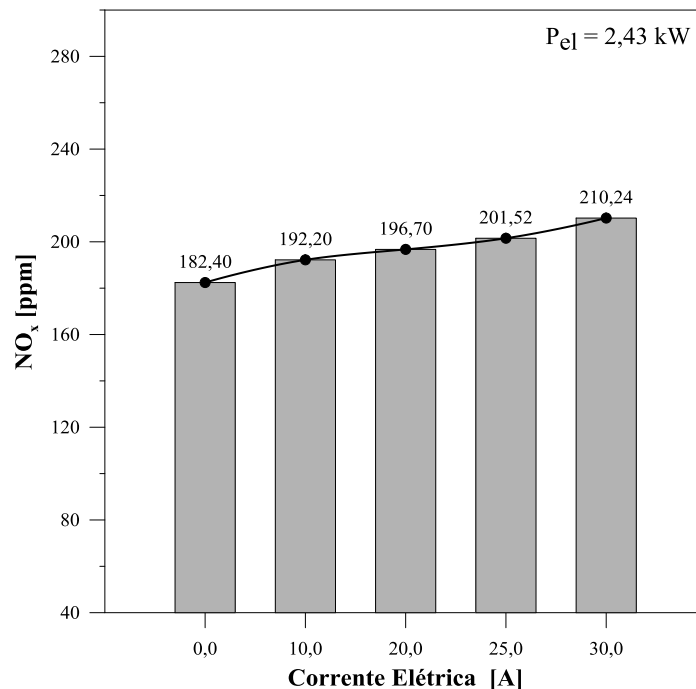


Figura 4. Temperatura dos gases de escape em função da corrente elétrica.

5. CONCLUSÕES

Após a elaboração do projeto e construção da célula eletrolítica para a produção de gás HHO, a mesma foi testada e verificou-se que o gás produzido era combustível. Em seguida pequenas quantidades do gás HHO, que representam significativas frações energéticas da mistura combustível, foram adicionadas ao B7 para verificar seus efeitos no

desempenho e nas emissões de um grupo gerador a diesel. Este estudo mostrou que mesmo uma pequena quantidade de gás HHO pode alterar o desempenho e as emissões do motor. A adição de gás HHO tende a melhorar o desempenho do motor, reduzindo seu consumo específico de combustível e suas emissões de CO, CO₂ e consequentemente de HC (já que na composição do HHO não contem o elemento carbono) a valores inferiores aos percentuais obtidos com a linha base utilizando apenas B7.

A corrente elétrica foi utilizada como parâmetro para variar a quantidade de gás HHO a ser injetada no motor. O aumento da quantidade de gás tende a elevar e antecipar o pico de pressão no interior do cilindro, elevando também a temperatura média dos gases no interior do cilindro, o que reflete no aumento das emissões de NO_x, onde esta condição pode ser agravada em cargas elevadas do motor. Tudo isso indica que o hidrogênio presente no gás HHO tende a promover uma combustão mais rápida com maiores taxas de liberação de calor.

Um ponto a destacar neste trabalho é que o gás HHO foi introduzido no coletor de admissão de ar de forma contínua, sem realizar nenhuma modificação ou instalação de complexos equipamentos no motor.

Ressaltando que o trabalho ainda encontra-se em desenvolvimento, analisando outros fatores de desempenho em grupo geradores diesel.

6. AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi apoiado pelo grupo de pesquisa EBMA (Energia, Biomassa e Meio ambiente) e pelo CEAMAZON (Centro de Excelência e Eficiência Energética da Amazônia), ambos da UFPA.

7. REFERÊNCIAS

- Al-Rousan, A. A. Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 35, n. 23, p. 129301-12935, 2010.
- Chiriac, R.; Apostolescu, N. "Emissions of a diesel engine using B20 and effects of hydrogen addition". *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 38, n. 30, p. 13453-13462, 2013.
- Deb, M., et al., An experimental study on combustion, performance and emission analysis of a single cylinder, 4-stroke DI-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015. 40(27): p. 8586-8598.
- Deb, M.; Sastry, G. R. K.; Bose, P. K.; Banerjee, R. "An experimental study on combustion, performance and emission analysis of a single cylinder, 4-stroke DI-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation". *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 40, n. 27, p. 8586-8598, 2015. emissions from a heavy-duty diesel engine by using hydrogen additions". *Fuel*, v. 172, p. 89-95, 2016.
- Hamdan, M.O., et al., Hydrogen supplement co-combustion with diesel in compression ignition engine. *Renewable Energy*, 2015. 82: p. 54-60.
- Jhang, S.-R.; Chen, K.-S.; Lin, S.-L.; Lin, Y.-C.; Cheng, W. L. "Reducing pollutant emissions from a heavy-duty diesel engine by using hydrogen additions". *Fuel*, v. 172, p. 89-95, 2016.
- Karagöz, Y.; Güler, İ.; Sandalci, T.; Yükses, L.; Dalkılıç, A. S. "Effect of hydrogen enrichment on combustion characteristics, emissions and performance of a diesel engine". *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 1, p. 656-665, 2016.
- Moraes, A. M; Justino, M. A. M; Osmano Souza Valente, Sergio de Moraes Hanriot, José Ricardo Sodré. "Hydrogen impacts on performance and CO₂ emissions from a diesel power generator". *International journal of hydrogen energy* v. 38 p. 6857-6864, 2013.
- Morsy, M.H., A.M. El-Leathy, and A. Hepbasli, An Experimental Study on the Performance and Emission Assessment of a Hydrogen/Diesel Fueled Engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2015. 37(3): p. 254-264.
- Musmar, S. E. A.; AL-ROUSAN, A. A. Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines. *Fuel*, v. 90, n. 10, p. 3066-3070, 2011.
- Pereira, R. S. "Avaliação e desempenho de motor de injeção indireta consumindo óleo de palma in natura". *Dissertação de mestrado. Belém/Pará. UFPA/FEM* 2016.
- Rajaram, P. S.; KANDASAMY, A.; REMIGIOUS, P. A. Effectiveness of oxygen enriched hydrogen-HHO gas addition on direct injection diesel engine performance, emission and combustion characteristics. *Thermal Science*, v. 18, p. 259-268, 2014.
- Rocha, Hendrick Maxil Zárate. "Determinação dos efeitos da utilização de hidrogênio em grupos geradores a diesel operando com diferentes misturas diesel-óleo vegetal". *Hendrick Maxil Zárate Rocha. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE*, 2016
- Sandalci, T. and Y. Karagöz, Experimental investigation of the combustion characteristics, emissions and performance of hydrogen port fuel injection in a diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014. 39(32): p. 18480-18489.
- Sur, A. A.; WALKE, P. R.; BASAVARAJ, M. Performance analysis of mono cylinder four stroke spark ignition engine by utilizing green gas (HHO gas) as a fuel supplement. *Golden Research Thoughts*, v. 3, n. 11, 2014.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

O trabalho é de responsabilidade do autor.

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF AN ELECTROLYTIC CELL FOR THE PRODUCTION OF HYDROGEN (HHO GAS) WITH DIESEL GENERATOR SET TEST

Ricardo da Silva Pereira, rspereira@ufpa.br^{1,2}

Hendrick Máxil Zarate Rocha, henzaro@gmail.com¹

Manoel F. Martins Nogueira, mfmn@ufpa.br¹

Danielle Regina da S. Guerra, daguerra@ufpa.br¹

Sara Pacheco Leão, sarapacheco40@gmail.com¹

¹Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Correa 01. CEP. 66075-110. Bairro Guamá, Belém (PA)

²Faculdade Estácio de Belém., Av. Governador José Malcher, sn. Belém (PA)

Abstract. *There is little solid experimental evidence regarding the use of hydrogen formed by water electrolysis (HHO) in internal combustion engines by mixing it with the intake air. This work aims to perform experimental tests on diesel generator set consuming B7 fuel with HHO gas injection in the intake air. The parameters of specific fuel consumption, exhaust emissions and gas temperature were evaluated. The experimental results show that there was a reduction of the specific fuel consumption and increase of the temperature of the exhaust gases and of the NOx emissions. The electric current of the electrolytic cell was a parameter used to vary the amount of gas produced by the cell.*

Keywords: *water electrolyser, HHO gas, generator set and diesel engine.*