

# ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL ASSOCIADO À GASOLINA EM MOTORES COMERCIAIS A COMBUSTÃO INTERNA

Michel Fábio de Souza Moreira<sup>1</sup>

Pollyana Gonçalves Rafael<sup>2</sup>

Nathália Elisa Cotta Corrêa Marques<sup>2</sup>

Fernanda Ferreira de Queiroz<sup>2</sup>

Kemer Tadeu de Oliveira Júnior<sup>3</sup>

Fábio Henrique de Pinho Tomaz<sup>3</sup>

Thácio Clever Ferreira Gomes<sup>3</sup>

Breno Luís Amoroso Senra<sup>3</sup>

Daniel Natann Pessoa de Sousa Branches<sup>3</sup>

Alexandre de Araujo Mesquita<sup>3</sup>

André Maia de Azevedo<sup>3</sup>

**Resumo:** O presente artigo apresenta um modelo de simulação em regime permanente de uma célula combustível para geração do gás HHO e seu uso combinado com gasolina em motores de combustão interna. A célula estudada está disponível no mercado brasileiro e promete, por parte de seus vendedores, uma redução no consumo de combustíveis fósseis e a redução na emissão de poluentes atmosféricos. Para o desenvolvimento do modelo proposto foram utilizados balanços de massa, energia e entropia, envolvendo a reação de eletrólise da água com hidróxido de Potássio (KOH) e a reação de combustão da gasolina nos motores. Os resultados da simulação computacional, realizada no MatLab, mostraram que a produção de hidrogênio teórica (onde os processos são ideais) é pequena comparada à quantidade de gasolina necessária, cerca de 14,13 vezes menos, apesar do hidrogênio apresentar um poder calorífico superior ao da gasolina, isenta de álcool, cerca de 2,7 vezes. A partir dos experimentos não foi possível observar economia do combustível original, condição também vivenciada pela maioria dos usuários do sistema. Um estudo mais detalhado e sugerido por alguns pesquisadores, seriam as alterações nos parâmetros de injeção eletrônica e testes com dinamômetro.

**Palavras – chave:** célula combustível, produção hidrogênio, motores a combustão interna, modelagem matemática, estudo experimental.

**Abstract:** This paper presents a permanent simulation model of a fuel cell for HHO gas generation and its combined use with gasoline in internal combustion engines. The cell studied is available in the Brazilian market and promises, on the part of its sellers, a reduction in the consumption of fossil fuels and the reduction in the emission of atmospheric pollutants. For the development of the proposed model, mass, energy and entropy balances were used, involving the reaction of water electrolysis with potassium hydroxide (KOH) and the combustion reaction of gasoline in the engines. The results of the computational simulation performed in MatLab showed that the production of theoretical hydrogen (where the processes are ideal) is small compared to the amount of gasoline required, about 14.13 times less, although the hydrogen has a higher calorific value than gasoline free of alcohol, about 2.7 times. From the experiments it was not possible to observe economy of the original fuel, a condition also experienced by the majority of the system users. A more detailed study that is suggested by some authors, would be changes in the parameters of electronic injection and tests with dynamometer.

**Keywords:** Fuel cell, hydrogen production, internal combustion engines, mathematical modeling, experimental study.

## INTRODUÇÃO

O crescente interesse no uso do hidrogênio, na forma do gás de Brown's (HHO), como combustível em veículos automotores está associado ao seu elevado poder calorífico e redução nas emissões atmosféricas em sua combustão (Sierens e Russel, 1998). Além disso, o aumento dos custos na compra de combustíveis derivados do petróleo tem se mostra-

do um forte atrativo para utilização de outras fontes energéticas. Associado aos fatores citados, existe a possibilidade de se utilizar o hidrogênio combinado a combustíveis convencionais em motores a combustão interna sem alterações representativas no veículo (Al-Rousan, 2010). Nessa aplicação, o hidrogênio produzido na célula combustível é inserido antes do carburador ou do sistema de injeção eletrônica, conforme mostrado na figura 1.

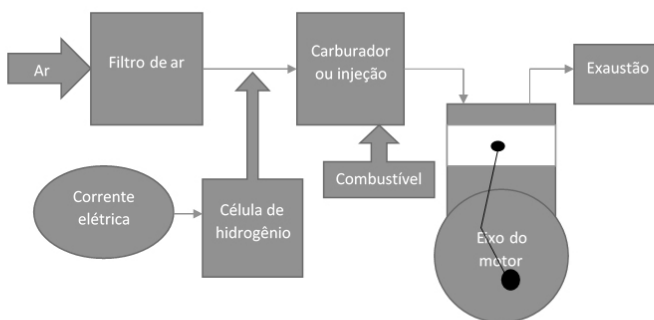


Figura. 1 – Diagrama esquemático de uma célula de hidrogênio instalada em um motor de combustão interna.

Nomenclatura	
$\dot{m}$ é a vazão mássica [kg/s]	$V_C$ subscrito que se refere ao volume de controle
$h$ é a entalpia específica [kJ/kg]	$r$ subscrito que se refere ao reservatório térmico
$V$ é a velocidade [m/s]	$FC$ subscrito que se refere a célula de combustível
$g$ é a aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]	<sup>o</sup> sobrescrito que se refere ao estado padrão de formação.
$Z$ é a cota [m]	$H_2O$ refere-se a molécula de água
$\dot{Q}$ é a taxa de transferência de calor [kW]	$H_2$ refere-se a molécula de hidrogênio
$t$ é o tempo [s]	$O_2$ refere-se a molécula de oxigênio
$\dot{W}$ é a potência [kW]	$C_8H_{18}$ refere-se a molécula de gasolina
$m$ é a massa [kg]	$C_2H_6O$ refere-se a molécula de álcool
$\underline{s}$ é a entropia específica [kJ/kg-K]	$CO_2$ refere-se a molécula de dióxido de carbono
$S$ é a entropia absoluta [kJ/K]	$N_2$ refere-se a molécula de nitrogênio
$\dot{I}$ é a taxa de produção de entropia [kW/K]	$KOH$ refere-se a hidróxido de potássio
$E$ é a energia [kJ]	$K^+$ refere-se ao íon (cátion) de potássio
$T_{en}$ é a tensão [volts]	$OH^-$ refere-se ao íon (ânion) hidróxido
$I$ é a corrente [A]	

Devido ao crescente interesse no gás HHO, diversos estudos associados a esse gás têm sido realizados, envolvendo desde o designe de novas células combustíveis (CF), produtoras desse gás, até a aplicação do hidrogênio em motores a combustão interna. Sadeghzadeh e Salehi (2010) analisaram tecnologias em desenvolvimento aplicáveis a células de combustíveis para indústria automoti-

va. Al-Rousan (2010) estudou a redução do consumo de combustíveis em motores a gasolina com a introdução do gás HHO no sistema de admissão. Nesse estudo, o autor relatou que a inserção do hidrogênio em motores a combustão interna pode ser feita sem alterações representativas no designe do veículo. Al-Rousan (2010) realizou testes em um motor monocilíndrico de 197 cc e relatou

que a área de superfície ótima de um eletrólito necessária para gerar uma quantidade suficiente de HHO é vinte vezes maior que a área da superfície do pistão. O autor também mencionou que o volume de água necessário na célula deve ser superior a 1,5 vezes a capacidade do motor para uma redução eventual de 20 – 30% no consumo de gasolina, baixa temperatura de exaustão, e, conseqüentemente, redução nas emissões de poluentes. Yimaz e Aydin (2010) produziram gás hidróxido (HHO) pelo processo de eletrólise a partir de diferentes eletrólitos ( $\text{KOH}_{\text{aq}}$ ,  $\text{NaOH}_{\text{aq}}$ ,  $\text{NaCl}_{\text{aq}}$ ) com vários projetos de eletrodos em um reator à prova de fuga (gerador de hidrogênio). O hidrogênio produzido foi usado como um combustível suplementar em um motor quatro cilindros, quatro tempos com compressão por ignição (CI), sem nenhuma modificação e sem nenhum tanque de armazenamento. Seus efeitos sobre os gases de exaustão emitidos e as características de performance do motor foram investigados. Por experimentos, Yimaz e Aydin (2010) mostraram que a taxa de fluxo constante com o motor em baixa velocidade (próxima à velocidade crítica de 1750 rpm para o estudo experimental) apresentou vantagens do sistema HHO. Yimaz e Aydin (2010) observaram o aumento do torque do motor, redução nas emissões de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e redução do consumo de combustível específico (SFC). Os autores também observaram que a taxa de fluxo de HHO tem diminuído em relação a velocidades do motor bem abaixo de 1750 rpm, devido ao longo tempo de abertura do coletor de admissão em baixas velocidades. Isso causou excessiva ocupação de hidróxido no cilindro, o qual por prevenção depositou a quantidade correta de ar a ser enviado à câmara de combustão e, conseqüentemente, diminuiu a eficiência volumétrica de maneira inevitável. A diminuição da eficiência volumétrica influenciou a eficiência da combustão, que teve efeitos negativos sobre o torque do motor e sobre as emissões. Por esse motivo, um sistema de controle para a unidade eletrônica para inserção de hidróxido foi projetado e construído por Yimaz e Aydin (2010). Esse dispositivo teve por finalidade a diminuição da taxa de fluxo de HHO através da diminuição da tensão e da corrente, que foram controladas automaticamente para compensar as desvantagens do gás HHO sobre o SFC (Consumo de combustível específico), torque do motor e emissões de exaustão para velocidades do motor bem abaixo de 1750 rpm. A taxa de fluxo de gás HHO foi medida usando catalisadores diferentes ( $\text{KOH}_{\text{aq}}$ ,  $\text{NaOH}_{\text{aq}}$ ,  $\text{NaCl}_{\text{aq}}$ ). Esses catalisadores foram adicionados dentro da água para diminuir as ligações de hidrogênio e oxigênio e o  $\text{NaOH}_{\text{aq}}$  foi o eletrólito mais apropriado. Yimaz e Aydin (2010) observaram que se o  $\text{NaOH}$  em solução exceder

1% por massa, a corrente elétrica fornecida a partir da bateria aumenta drasticamente devido à redução drástica da resistência elétrica. Esses autores também observaram que sistemas de adição de HHO para o motor sem qualquer modificação resulta no aumento do torque de saída, em uma média de 19,1%, reduzindo as emissões de CO para uma média de 13,5 %, as emissões de HC para uma média de 5% e SFC para uma média de 14%. Steinbrück et. al. (2011) investigaram as vantagens de misturas de ar e hidrogênio em sistemas de combustão para sistemas envolvendo células de combustíveis. Segundo os autores, a pré mistura de hidrogênio e ar, se feita de forma adequada, pode eliminar os riscos de propagação de chamas de retorno, além de redução nas emissões de  $\text{NO}_x$ . Ahluwalia, Peng e Hua (2014) avaliaram as propriedades de metais híbridos para a construção de tanques automotivos para o armazenamento de hidrogênio, para uso em células combustíveis com eletrólitos poliméricos em baixas temperaturas. Ahluwalia Peng e Hua (2014) determinaram relações termodinâmicas entalpia e entropia de sorção para sistemas de armazenamento termodinamicamente integrado com células combustíveis com reabastecimento de hidrogênio em pressões de 50 a 200 atm. Liu et. al. (2014) propuseram o modelo de diferenciação numérica adaptativo para um eletrólito polimérico para aplicações em células combustíveis para aplicação automotiva. Abderezzak, Khelidj e Abbes (2014) relataram que o hidrogênio é uma fonte de energia e pode ser usado na indústria, residências e aplicações móveis. Os autores relataram também que o hidrogênio pode substituir os combustíveis fósseis. Abderezzak, Khelidj e Abbes (2014) realizaram um estudo sobre a produção e utilização do hidrogênio a partir de energia solar em uma célula combustível simples com membrana polimérica eletrolítica. Arat et. al. (2016) realizaram um estudo experimental com o Hidrogênio (HHO, Oxyn – Hydrogen) com CNG (Gás natural comprimido) em uma mistura combustível em um motor a diesel não modificado. Essa mistura foi introduzida no motor, via coletor de admissão, pela substituição do diesel como combustível. Arat et. al. (2016) realizaram três experimentos em um motor com capacidade de 3,6 litros, quatro cilindros, a diesel e quatro tempos; no primeiro caso o diesel não foi substituído, operação com diesel puro; no segundo caso usou-se HHO (5,1 lpm) adicionados à mistura de ar substituindo o diesel; no terceiro caso foi considerada a mistura 25HHO-CNG (25% de hidróxido e 75% CNG – 5,1 – 15,3 lpm), enviados ao sistema de admissão como substituição ao diesel. Durante os testes, Arat et. al. (2016) acionaram o motor e aceleraram o mesmo através de uma bomba de pistão para a mistura de combustível

proposta para substituição do diesel de forma similar a injeção tradicional ocorrida com esse combustível. Os efeitos do HHO e do HHOCNG combustíveis relativos ao uso do diesel puro foram investigados entre as rotações de 1200 a 2600 rpm (velocidade do motor) e ambos foram expressos em termos de rendimento; torque de frenagem, queda de potência, redução específica no consumo de combustível e queda na eficiência térmica; emissões na exaustão; NOx, CO<sub>2</sub>, CO e temperatura de exaustão do gás (EGT). Arat et. al. (2016) mostraram que a adição da mistura HHO-CNG é mais adequada à melhoria da performance do motor e proporciona uma atitude ambientalmente amigável sobre as emissões atmosféricas comparado ao acionamento do motor com diesel puro. Baltacioglu et. al. (2016) compararam as características de performance e admissão em um sistema de injeção de um motor a diesel com adição de combustíveis alternativos como hidrogênio, HHO e biodiesel. Para alcançar esse objetivo, o biodiesel foi produzido e misturado com a razão volumétrica de 10% com diesel combustível. Adicionalmente a admissão de ar foi enriquecida com hidrogênio puro ou HHO, via coletor de admissão sem qualquer mudança estrutural, exceto na redução de injeção de diesel combustível sobre máquinas com 4 e 6 cilindros, motor a diesel 4 tempos. A quantidade de hidrogênio combustível fornecida ao motor foi ajustada para o valor constante de 10 litros/min durante os experimentos. Os efeitos do hidrogênio puro e do HHO usado com o adicional do biodiesel para os valores de performance do motor (Queda de torque, queda potência, consumo) e valores de emissões na exaustão (NOx, CO<sub>2</sub>, CO) foram investigados por Baltacioglu et. al. (2016) entre rotações de 1200 a 2600 rpm de velocidade. A performance do motor foi aumentada com o enriquecimento da admissão de ar com HHO mais que com o hidrogênio puro comparado ao combustível diesel funcionando em condição padrão. Por outro lado, em termos de emissão de gases de exaustão, o hidrogênio puro proporcionou melhores resultados que o HHO. Em ambos os casos, mudanças sobre os resultados da performance do motor mínimos, contudo melhoramentos sobre a exaustão de gases de exaustão foram muito promissores.

Além dos estudos apresentados, existem outros relativos à modelagem termodinâmica de células projetadas para produção de hidrogênio ou sua utilização como fonte energética. Sacramento et. al. (2008) propuseram um programa de energia através do uso de hidrogênio por eletrólise para o estado do Ceará no Brasil. A produção de hidrogênio seria realizada por meio de painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas. O hidrogênio gerado seria usado em diversas aplicações onde os combustíveis fósseis

são utilizados nos dias de hoje. Os cenários de inserção de introdução de hidrogênio a curto e a longo prazo e da não inserção desse combustível foram previstos por Sacramento et. al. (2008). Resultados indicaram que a introdução de energias renováveis como o hidrogênio irá aumentar o consumo dessa forma de energia e a produção interna bruta per capita no estado do Ceará. Ao mesmo tempo será reduzida a poluição originada pela combustão de combustíveis fósseis com conseqüente aumento da qualidade de vida da população. Balta, Dincer e Hepbalsi (2010) estudaram quatro métodos potenciais para a produção de hidrogênio, a saber: 1) diretamente a partir do fluxo geotérmico, 2) através da eletrólise convencional da água usando eletricidade gerada a partir da planta de potência geotérmica, 3) usando ambos, calor geotérmico e eletricidade para altas temperaturas do vapor na eletrólise e/ou processo, 4) usando o calor disponível a partir de uma fonte geotérmica no processo termodinâmico para dissociar água em hidrogênio e oxigênio. Balta, Dincer e Hepbalsi (2010) tiveram como foco a baixa temperatura termodinâmica relativa e ciclos híbridos, devido a suas grandes variedades de aplicações e o potencial para produção de hidrogênio usando calor geotérmico. Balta, Dincer e Hepbalsi (2010) também apresentaram uma breve análise termodinâmica para avaliar a performance através de eficiências energética e exergetica por propósitos de comparação. Os resultados apresentados por Balta, Dincer e Hepbalsi (2010) mostraram que esses ciclos híbridos têm bom potencial e são atrativos devido à eficiência global maior que 50%. O ciclo cobre-cloro foi identificado pelos autores como o ciclo mais promissor para a produção geotérmica de hidrogênio. El-Emam e Dincer (2015) avaliaram a performance de um novo sistema de energia integrando a gaseificação da biomassa e sistemas de células combustíveis usando eficiências energéticas e exergeticas. O modelo termodinâmico da célula de combustível de óxido sólido foi introduzido e integrado com o sistema de produção de potência por El-Emam e Dincer (2015). O modelo proposto foi validado e os diferentes efeitos de parâmetros de operação sobre a performance do sistema foram estudados sob várias condições. Diferentes valores da temperatura de operação de gaseificação e umidade associados ao combustível também são considerados em estudos paramétricos. Os resultados apresentados por El-Emam e Dincer (2015) mostraram que as razões de fluxos de biomassa têm um efeito significativo sobre a produção de hidrogênio e o valor ótimo é de 0,677, calculado para a eficiência exergetica máxima.

Dos estudos apresentados, a inserção de pequenas quantidades de hidrogênio em motores a combustão interna combinada a combustíveis comerciais (como a

gasolina, etanol e diesel) foi investigada de forma experimental (Sierens and Russel, 1998; Rousan, 2010; Yimaz e Aydin, 2010; Steinbrück et. al., 2011; Arat et. al., 2016; e Baltacioglu et. al., 2016). O presente artigo tem por objetivo desenvolver um modelo termodinâmico de uma célula de hidrogênio e do processo de combustão do gás HHO combinado a um combustível comercial para verificação de uma possível redução em seu consumo. No caso do presente artigo, a gasolina foi considerada. Para esse estudo o modelo matemático proposto foi implementado e simulado no software Matlab. A célula de combustível estudada foi construída e instalada em um automóvel com motor de 1000 cilindradas, popularmente chamado de 1.0 no Brasil.

## MODELO TERMODINÂMICO DA CÉLULA COMBUSTÍVEL E DO PROCESSO DE COMBUSTÃO

Para o desenvolvimento dos modelos termodinâmicos da célula de combustível e do processo de combustão foram realizados balanços de massa (Equação da Continuidade – Eq. 2), de energia (Primeira Lei da Termodinâmica – Eq. 2) e de entropia (Segunda Lei da Termodinâmica – Eq. 3) aplicados a sistemas abertos (Sonntag e Borgnakke, 2006).

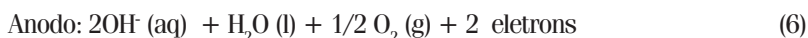
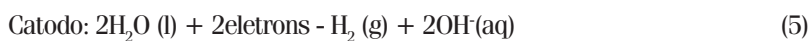
$$\sum_{entrada} \dot{m} - \sum_{saída} \dot{m} = \frac{dm_{VC}}{dt} \quad (1)$$

$$\sum \dot{Q} - \sum \dot{W} = \sum_{saída} \dot{m} \left( h + \frac{1}{2} V^2 + gZ \right) - \sum_{entrada} \dot{m} \left( h + \frac{1}{2} V^2 + gZ \right) + \frac{dE_{VC}}{dt} \quad (2)$$

$$\dot{\Pi} = \sum_{saída} \dot{m} s - \sum_{entrada} \dot{m} s + \frac{dS_{VC}}{dt} - \sum \frac{Q_r}{T_r} \geq 0 \quad (3)$$

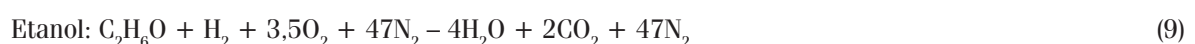
Para o desenvolvimento do modelo proposto foram feitas as seguintes considerações que resultaram em modificações nas equações anteriormente apresentadas:

1. Regime permanente: as propriedades e grandezas são constantes ao longo do tempo;
2. Foram desprezadas as energias cinéticas e potenciais;
3. Não há superaquecimento na célula de combustível;
4. O processo de hidrólise foi considerado reversível;
5. As reações de hidrólise da água consideradas foram:



A reação principal foi misturada ao KOH e houve fornecimento de corrente elétrica.

6. O eletrólito utilizado não interfere na reação e nem é aquecido pela corrente elétrica fornecida pela célula de combustível;
7. A reação de combustão da gasolina (octano) considerada foi:



8. Na reação de combustão, foi considerada uma razão ar/combustível variável aleatória dentro de um intervalo preestabelecido conforme condições operacionais de motores com 1000 cilindradas;
9. O processo de combustão da gasolina (ou do álcool) não interfere na combustão do hidrogênio na câmara de explosão.

As entalpias e calores específicos das reações químicas foram calculadas com base na lei de Hess (Atkins, 2003) para condições diferentes das condições normais de temperatura e pressão que são apresentadas a seguir:

$$\Delta H_{\text{formação; reação}}^{\circ} = \sum \Delta H_{\text{formação; produtos}}^{\circ} - \sum \Delta H_{\text{formação; reagentes}}^{\circ} \quad (10)$$

$$Cp_{\text{formação; reação}}^{\circ} = \sum Cp_{\text{formação; produtos}}^{\circ} - \sum Cp_{\text{formação; reagentes}}^{\circ} \quad (11)$$

$$\Delta H_{\text{formação; temperatura; desejada}} = \Delta H_{\text{formação; reação}}^{\circ} + Cp_{\text{formação; reação}}^{\circ} (T_{\text{desejada}} - T_{\text{formação; reação}}^{\circ}) \quad (12)$$

Além da lei de Hess, as entalpias dos componentes das reações podem ser obtidas através de tabelas termodinâmicas apropriadas ou por equações de estado (Sonntag e Borgnakke, 2006).

O modelo termodinâmico resultante das equações apresentadas para a célula combustível, com uma entrada e uma saída (Fig. 2) funcionando em regime permanente, foi o seguinte:

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{O_2} \quad (13)$$

Equação da continuidade:

Primeira Lei da Termodinâmica:

$$\dot{m}_{H_2O} h_{H_2O} + \dot{W}_{FC} = \dot{m}_{H_2} h_{H_2} + \dot{m}_{O_2} h_{O_2} \quad (14)$$

Na equação 14, o termo  $\dot{W}_{FC}$  refere-se à potência produzida pela corrente elétrica na célula combustível e é calculado pela equação 15.

$$\dot{W}_{FC} = Ten_{FC} \cdot I_{FC} \quad (15)$$

Para o processo de combustão o modelo clássico apresentado por Moran e Shapiro (2006), foi considerado e combinado a balanços de massa (Eq. 16) e energia (Eq. 17), aplicados à câmara de combustão.

$$\dot{m}_{oc\ tan\ o} + \dot{m}_{H_2} + (\dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{O_2;ar}) = \dot{m}_{H_2O;reação} + \dot{m}_{CO_2} \quad (16)$$

$$\dot{Q}_{dissipado} + \dot{W}_{motor} + \dot{m}_{H_2O;reação} h_{H_2O;reação} + \dot{m}_{CO_2} h_{CO_2} = \dot{m}_{oc\ tan\ o} h_{oc\ tan\ o} + \dot{m}_{H_2} h_{H_2} + \dot{m}_{O_2} h_{O_2} \quad (17)$$

## METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Devido ao grande número de variáveis aleatórias, o modelo proposto foi resolvido de forma estocástica. E para sua solução foi implementado o algoritmo Genético de John Holland (Holland, 1975). Esse algoritmo é aplicado quando o problema apresenta pelo menos uma variável estocástica ou quando não se conhece algumas das condições de contorno. A solução a partir do Algoritmo Genético não é analítica, mas sim uma aproximação obtida a partir de técnicas probabilísticas de busca. Dessa forma, os algoritmos genéticos também podem ser chamados de metaheurísticos, algoritmos exploratórios ou algoritmos populacionais.

As etapas para a solução do modelo proposto para a célula de hidrogênio estudada e do processo de combustão operando em regime permanente, a partir do Algoritmo Genético, são as seguintes: 1º passo – Criou-se de uma função objetivo a minimizada dentro de um intervalo definido muito próximo de zero. Essa função objetivo é necessária à implementação do Algoritmo Genético e foi criada a partir da equação 17; 2º passo – Seleção de um intervalo característico das variáveis de entrada no modelo operando em regime permanente (no caso um modelo agrupado). As variáveis de entrada nesse modelo foram a vazão, a concentração da solução de KOH e a velocidade do automóvel; 3º Passo – obtenção de um número de soluções aleatórias (em termos técnicos é chamado de criação da população ou criação dos cromossomos); 4º passo – Seleção e estudo das soluções obtidas, que melhor aproximam de zero a função objetivo, e que constam as variáveis de entrada (os genes). Os passos descritos estão apresentados no fluxograma 1 que ilustra a metodologia de solução do modelo proposto para célula combustível estudada e o processo de combustão, ambos operando em regime permanente.

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E CUSTOS DE MONTAGEM

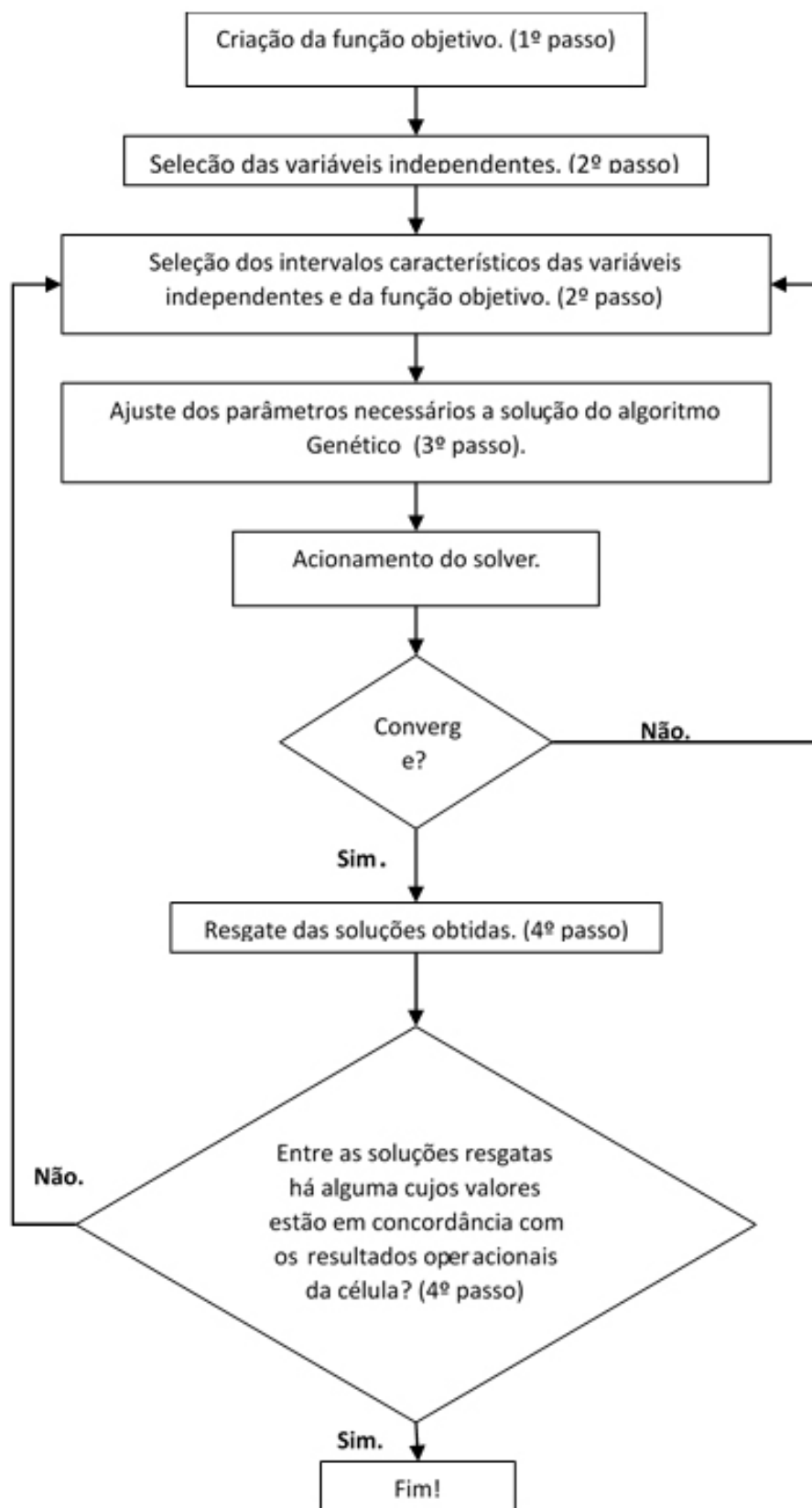
O procedimento experimental foi baseado em pro-

jetos de células de combustíveis de domínio público (INPI, 2008), também encontradas à venda no comércio (kits geradores de hidrogênio ou kits HHO). A célula foi construída, estudada e montada no motor de combustão interna presente no laboratório do Centro Universitário Newton Paiva. Os materiais empregados na construção da célula estão sintetizados na Tabela 1.

Após a aquisição da maioria dos componentes citados na tabela 1, a célula de combustível foi montada conforme o detalhamento apresentado na figura 2. A montagem do sistema está a ser instalado no motor está esquematizada na figura 3.

Na figura 2, observa-se o projeto da célula de combustível seca normalmente referenciada no mercado como célula HHO. O projeto, nas dimensões apresentadas, é normalmente aplicado a motores com até 2000 cilindradas. Os materiais normalmente empregados são aços inoxidáveis de diferentes composições. No presente trabalho, a célula foi montada com o aço inox 306L. A célula foi fechada em suas extremidades com placas de acrílico com 10 mm de espessura e com parafusos em aço e porcas anti - vibração. A entrada de água destilada com eletrólito foi feita a partir de furos, abertura de rocas com macho e engates rápidos de 8 mm. A saída de hidrogênio, eletrólito e água que não reagiu foi feita da mesma forma que a entrada. Entretanto, a saída é localizada a uma cota superior à da entrada. Nas conexões de engate rápido, foram utilizadas mangueiras apropriadas, resistentes ao aquecimento, devido à possibilidade de aquecimento da solução na célula.

Na figura 3, é apresentado esquema geral de montagem do sistema em relação ao motor de combustão externa. Os componentes utilizados e a finalidade de cada um deles, bem como os custos estimados para cada um deles é apresentado na bela 1. O esquema apresentado na figura 3 foi seguido, entretanto apenas uma saída e uma entrada do reservatório foram montadas, condição diferente da figura apresentada. Na figura 3, também não é mostrada a válvula anti-chamas, que foi instalada à entrada do hidrogênio no motor.



**Fluxograma 1 – Metodologia de solução para o modelo proposto da célula de hidrogênio estudada e do processo de combustão.**



**Tabela 1 – Orçamento estimado e função dos componentes para construção da célula de combustível**

Recurso	Quant.	Valor unitário estimado	Valor total estimado	Função
Placa de acrílico transparente 15cm X 15cm com 10mm de espessura	4	25,00	100,00	Fechamento da célula de hidrogênio
Válvula anti - chamas	2	60,00	120,00	Para evitar que o hidrogênio produzido se propague em seu processo de combustão.
Reservatório de água destilada (ou desmineralizada)	1	85,00	170,00	Funciona como um tanque de combustível, mas para a água de onde se obtém - o hidrogênio.
Fio de 4mm	12 metros	3,00	36,00	Ligação entre a bateria o fusível, o relé e os polos da célula
Mangueira de PU transparente	4 metros	12,00	48,00	Transporte de hidrogenio da célula de combustível para o filtro de ar passando pela válvula anti - chamas.
Mangueira de PU azul	6 metros	12,00	72,00	Para transporte da água desmineralizada à célula de hidrogênio.
Relé auxiliar 4 pinos	2	8,00	16,00	Para ligação da bomba de combustível.
Fusível 30A com porta Hidróxido de potássio (KOH)	2	8,00	16,00	Para evitar a queima da bomba de combustível do automóvel.
	600 g	36,00	72,00	Para otimizar o processo de eletrólise, o KOH deve ser misturado em quantidade correta a água desmineralizada.
EFIE Digital para sonda lambda	2	300,00	600,00	Para que a injeção eletrônica do automóvel funcione de forma correta.
Controlador MAF/MAP	1	-	-	Para controle relação ar/combustível de forma a reduzir a entrada de gasolina ou etanol e ampliar a entrada de hidrogênio.
PWM digital 30 A	1	270,00	270,00	Para proporcionar uma maior transferência de calor e evitar a evaporação da água e superaquecimento da célula a combustível reduzindo a produção de hidrogênio
Conectores para ligação	20	8,00	160,00	União adequada das mangueiras de água e de hidrogênio.
Chapa de aço 304L	30	15,00	450,00	Para construção dos eletrodos da célula de hidrogênio.
Gasolina	18,9 litros	3,70	70,00	
<b>VALOR TOTAL</b>			<b>2200,00</b>	

Observação: – Valores cotados em dezembro de 2015.

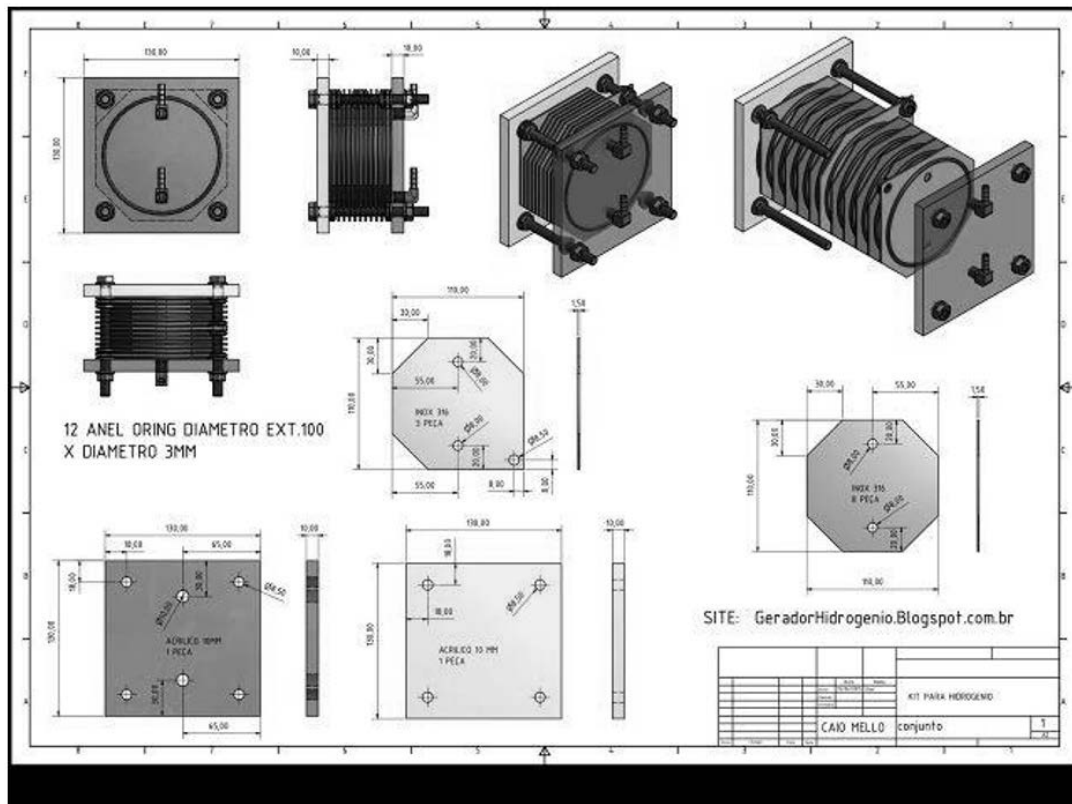


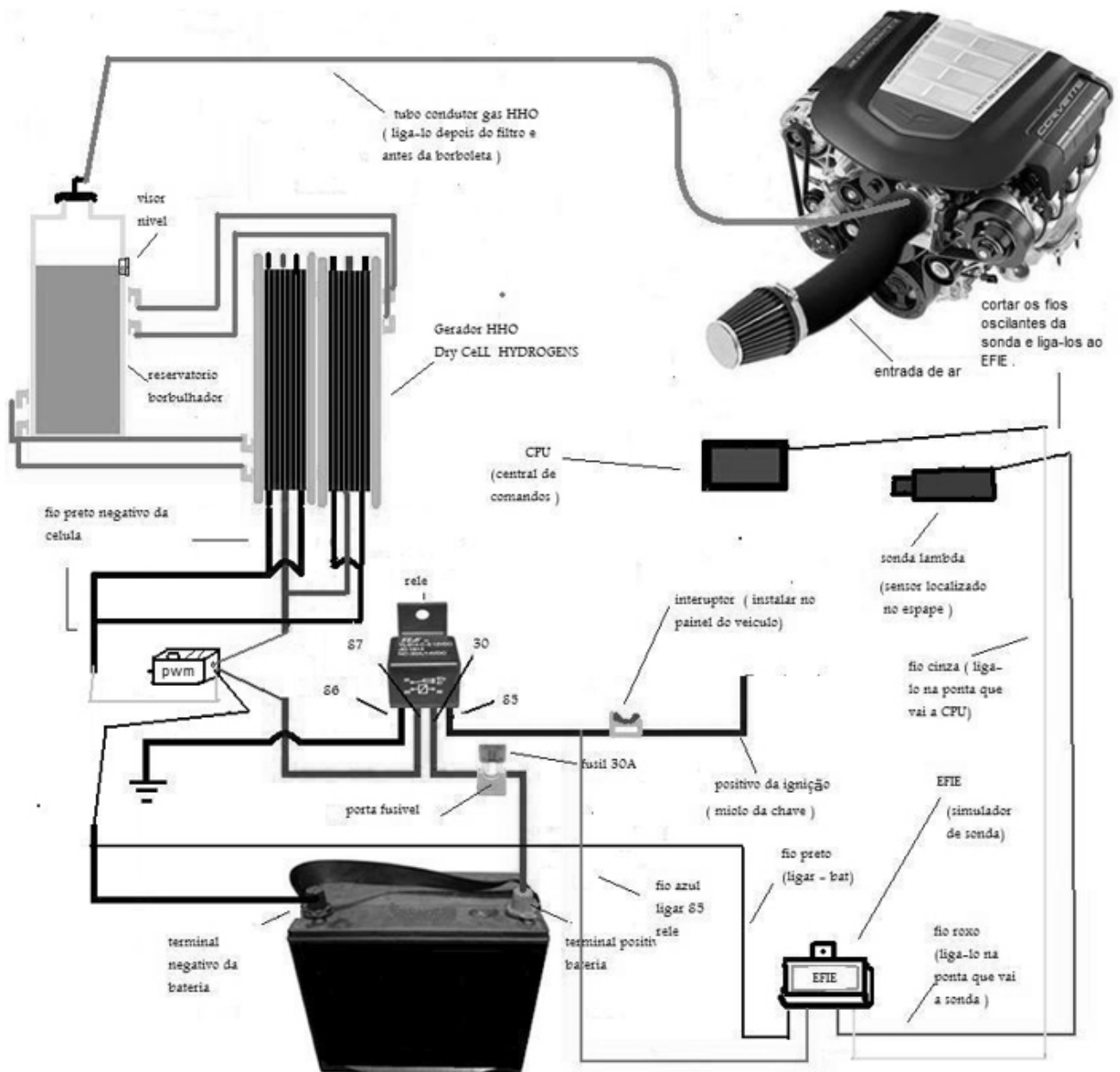
Figura 2 – Projeto de uma célula Hho comercial.

Fonte: <http://img.olx.com.br/images/75/759527031776292.jpg>.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na simulação computacional, utilizando modelo desenvolvido, manteve-se constante a vazão mássica da solução igual a 0,005 l/min, água desmineralizada e hidróxido de potássio (KOH), na seguinte proporção 6,17 g de KOH para 0,5 litros de água. Adicionalmente variou-se a corrente de acionamento da célula no intervalo de 10 a 20 ampères, condição produzida no funcionamento do veículo em regime permanente a uma velocidade de cerca de 60 km/h. Os resultados dessa simulação são apresentados na figura 4, onde se observa que a maior quantidade de vazão mássica produzida é de oxigênio ( $O_2$ ), que é cerca de seis vezes maior que a vazão mássica do hidrogênio ( $H_2$ ). Por esse gráfico observa-se também o aumento relativo da vazão mássica de hidrogênio com o aumento da temperatura da célula e da corrente de acionamento (análise teórica). Entretanto, com esse aumento hipotético de temperatura e corrente, observa-se

que a vazão mássica de hidrogênio é cerca de 5,3 vezes menor que a vazão de oxigênio na célula. O comportamento da variação na produção de hidrogênio e de oxigênio, a partir da célula, é quadrático como é mostrado nas figuras 5 e 6, respectivamente. Nessas figuras o comportamento observado na figura 4 ainda é mantido. Na prática, os vendedores do sistema utilizam rotômetros de esfera como medidores de vazão que variam normalmente no intervalo de 0 a 15 litros por minuto. Devido a essa escala, as vazões volumétricas foram obtidas a partir das vazões mássicas apresentadas nas figuras 5 e 6. Os resultados dessa simulação são apresentados na figura 7. Com base nos resultados observados na figura 7, observa-se que a vazão volumétrica de oxigênio é a única percebida na escala do rotômetro mencionado. Os rotômetros utilizados pelos vendedores do sistema são para medição de oxigênio ( $O_2$ ), que possui uma massa específica de cerca de 15,8 vezes superior a massa específica do hidrogênio ( $H_2$ ).



**Figura 3 – Esquema detalhado de montagem do sistema de produção de hidrogênio em motores de combustão interna.**

Os resultados do modelo proposto relativo à câmara de combustão mais importantes são aqueles relacionados à comparação entre as vazões mássicas da gasolina e do hidrogênio (Tabela 2). Dessa tabela, observa-se que a vazão mássica da gasolina é cerca de 14,13 vezes maior que a de hidrogênio ( $H_2$ ). Para obtenção desses resultados foi considerado que o rendimento do motor é de 25%, uma potência de acionamento de 20 HP associada a velocidades de cerca de 60 km/h, temperatura média na câmara de combustão de 200°C, pressão média na câmara de combustão

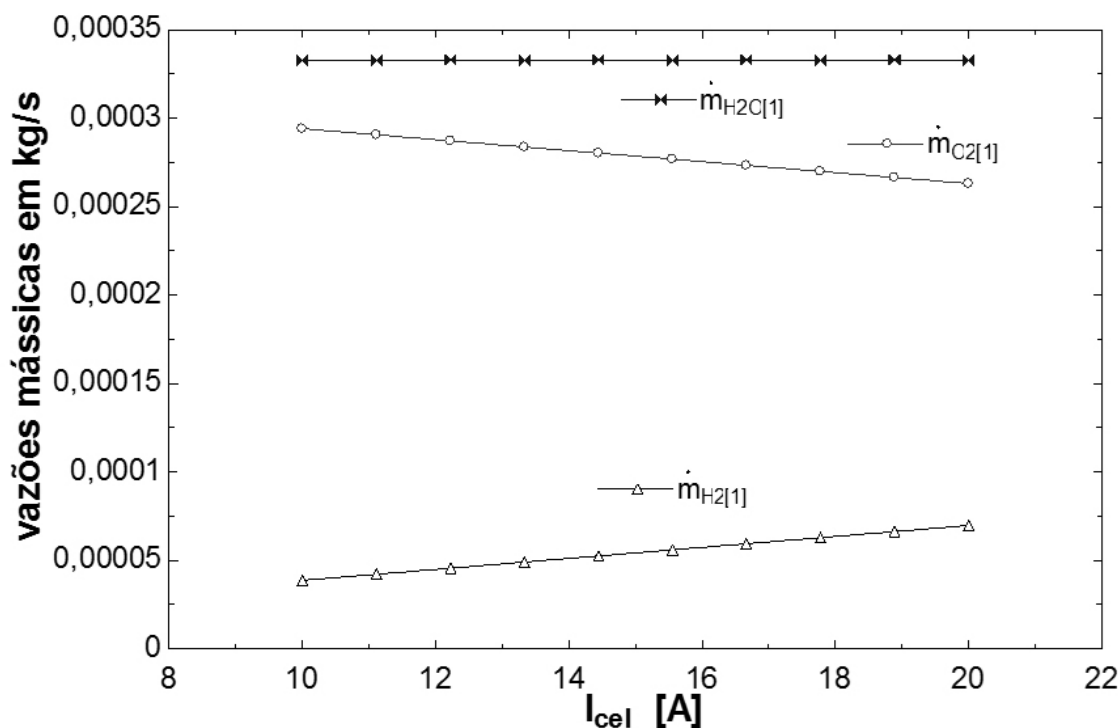


Fig. 4 – Vazões de hidrogênio e oxigênio obtidas com o modelo matemático proposto no processo de eletrólise variando-se a corrente elétrica e a temperatura de acionamento.

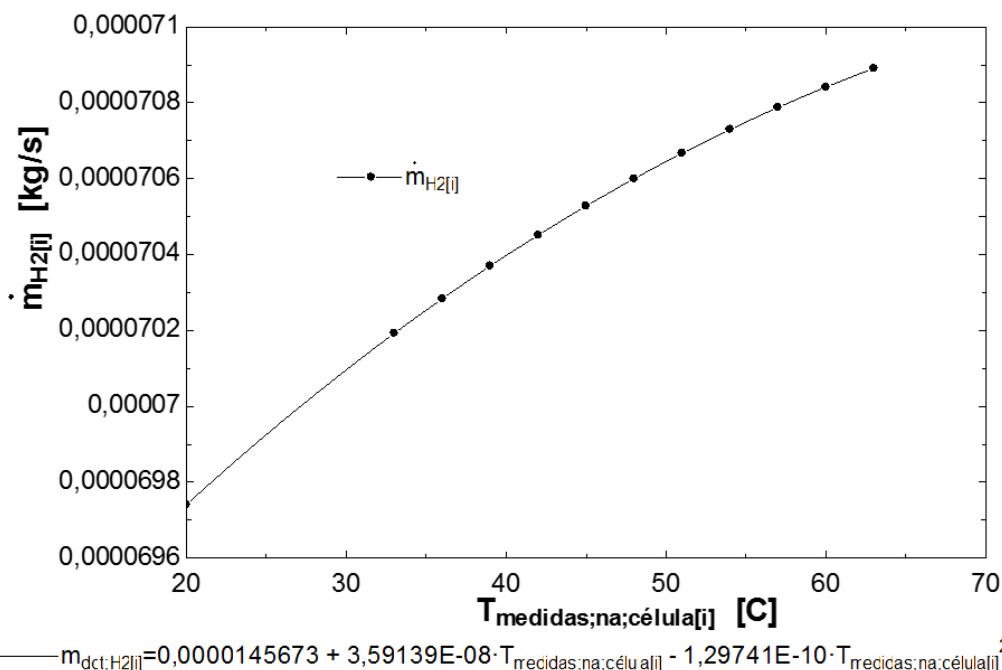


Fig. 5 – Vazões de hidrogênio obtidas com o modelo matemático proposto no processo de eletrólise com corrente elétrica constante (18A) e variando-se a temperatura da célula.

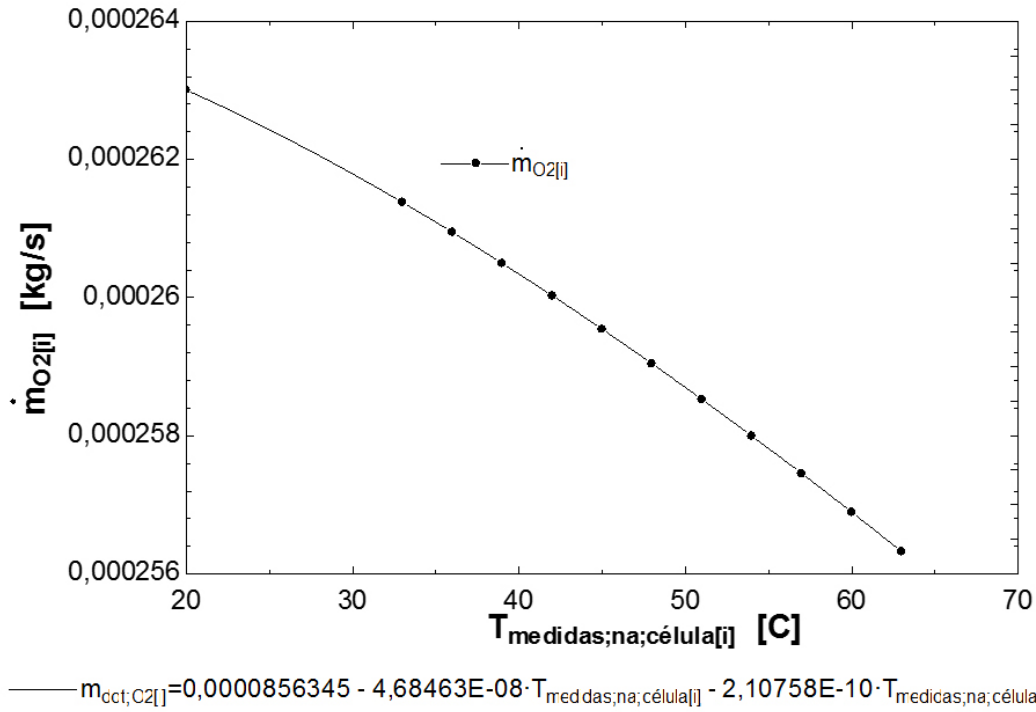


Fig. 6 – Vazões de oxigênio obtidas com o modelo matemático proposto no processo de eletrólise com corrente elétrica constante (18A) e variando-se a temperatura da célula.

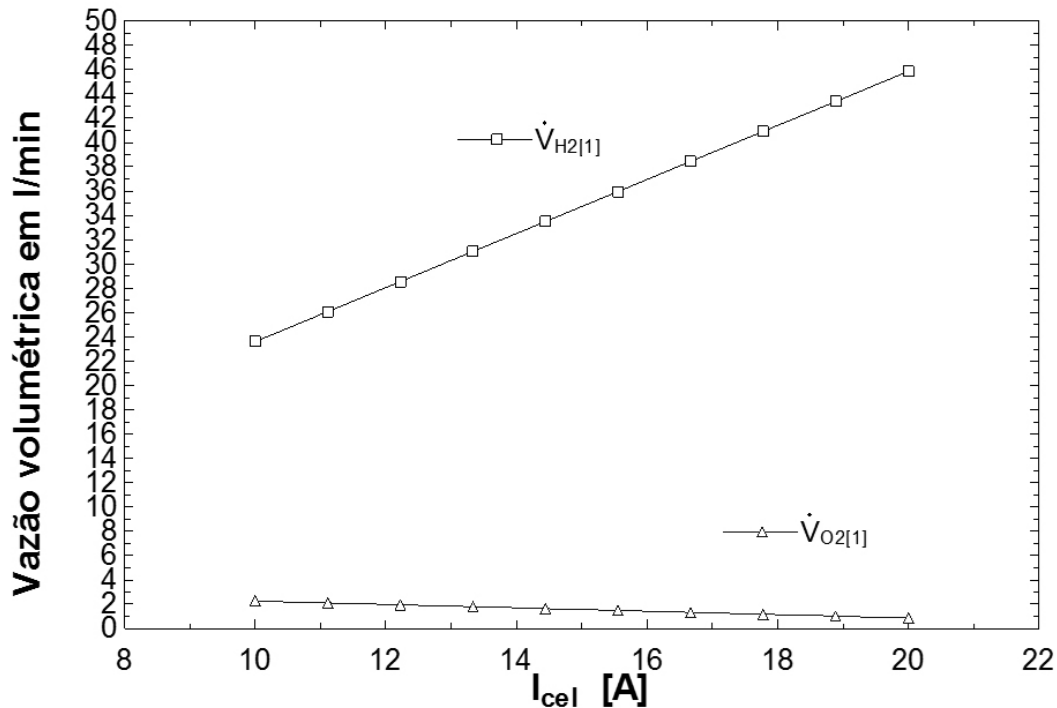


Fig. 7 – Vazões volumétricas de hidrogênio e oxigênio obtidas com o modelo matemático proposto no processo de eletrólise com corrente elétrica e temperatura da célula variáveis.

de 5 atmosferas e razão de compressão de 14,95. O poder calorífico inferior do hidrogênio é de cerca de 120802 J/g e o da gasolina (isenta de álcool) é de cerca de 46900 J/g, ou seja, o poder calorífico do hidrogênio é cerca de 2,6 vezes maior que o da gasolina pura. A vazão mássica da gasolina, cerca de 14,13 vezes maior que a de hidrogênio ( $H_2$ ), foi obtida considerando que não há aquecimento na célula e que todos os processos são reversíveis, para o processo real essa proporção é maior.

Com a instalação e utilização diária (período de 5 dias de testes em trajetos urbanos) do sistema em um veículo de 1000 cilindradas, usando todos os componentes indicados na tabela 1, não foi observada a economia de combustível. Tal observação é a mesma feita pela maioria dos usuários do sistema que buscam a redução do consumo de combustíveis convencionais.

## CONCLUSÕES

As células de combustíveis disponíveis no mercado brasileiro, que podem ser facilmente adaptadas nos veículos automotores, também chamadas de “Células Hho” foram estudadas. Para esse estudo, células de combustíveis similares a células comerciais foram construídas. A célula estudada, amplamente disponível no mercado brasileiro promete, por parte de seus vendedores, uma redução no consumo de combustíveis fósseis (de 30 a 80%) e a redução na emissão de poluentes atmosféricos.

Para a realização do estudo foi desenvolvido um modelo matemático a partir balanços de massa, energia e entropia, envolvendo a reação de eletrólise da água com hidróxido de Potássio (KOH) e a reação de combustão

**Tabela 2 - Comparação entre as vazões mássicas da gasolina e do hidrogênio necessárias na câmara de combustão obtidas através do modelo proposto.**

$m_{H_2O}[i]$ [kg/s]	$m_{O_2}[i]$ [kg/s]	$m_{H_2}[i]$ [kg/s]	$m_{octano}[i]$ [kg/s]
0,0001331	0,00007415	0,00005894	0,000833
0,0001326	0,00007484	0,00005779	0,000833
0,0001325	0,00007496	0,00005753	0,000833
0,0001323	0,00007507	0,00005728	0,000833
0,0001322	0,00007516	0,00005703	0,000833
0,000132	0,00007525	0,00005678	0,000833
0,0001319	0,00007532	0,00005654	0,000833
0,0001317	0,00007538	0,0000563	0,000833
0,0001315	0,00007543	0,00005606	0,000833
0,0001313	0,00007547	0,00005583	0,000833
0,0001311	0,0000755	0,0000556	0,000833
0,0001309	0,00007552	0,00005537	0,000833

da gasolina nos motores. Os resultados da simulação computacional realizada no MatLab mostraram que a produção de hidrogênio teórica é reduzida, cerca de 14,13 vezes menos, comparada à quantidade de gasolina necessária. Para uma maior produção de hidrogênio torna-se necessária uma solução adequada de água destilada com eletrólito, um alternador de maior potência para o acionamento da célula combustível, baterias extras, além da regulagem dos parâmetros da injeção eletrônica

para se reduzir a quantidade de combustível original, para talvez se obter alguma economia. A partir dos experimentos, sem alteração das condições operacionais do motor, não foi possível observar uma economia de combustível original, condição também observada pela maioria dos usuários do sistema. Para uma possível economia, como observado por alguns pesquisadores, os parâmetros citados devem ser alterados e testes com o dinamômetro devem ser realizados.

## REFERÊNCIAS

- R. Sierens, E. Rosseel. Variable composition hydrogen/natural gas mixtures for increased engine efficiency and decreased emissions. In: proceedings of the spring engine technology conference; FortLauderadae; 1998 April 26 e 29. ASME; 1998. p. 98-ICE-105.
- A. A. Al-Rousan. Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mutah University, Mutah, Al-Karak 61710 Jordan. *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (2010).
- A. C. Yilmaz, E. Uludamar, K. Aydin. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines Department of Mechanical Engineering, Ukurova University, 01330 Adana, Turke. *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (2010)
- H. T. Arat, M. K. Baltacioglu, M. Ozcanli, K. Aydin. Effect of using Hydroxy e CNG fuel mixtures in a non-modified diesel engine by substitution of diesel fuel. *International Journal of Hydrogen Energy* 41 (2016).
- M. K. Baltacioglu, H. Arat, M. Ozcanli, K. Aydin Experimental comparison of pure hydrogen and HHO (hydroxy) enriched biodiesel (B10) fuel in a commercial diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy* 41 (2016).
- R. S. El-Emam, I. Dincer, Thermal modeling and efficiency assessment of na integrated biomass gasification and solid oxide fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy* 40 (2015).
- M. T. Balta, I. Dincer, A. Hepbasli. Potential methods for geothermal-based hydrogen production Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ege University, 35100 Bornova, Izmir, Turkey b Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology (UOIT), 2000 Simcoe Street North, Oshawa, ON L1H 7K4, Canada. *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (2010).
- E.M. Sacramento, A.D. Salesa, L.C. de Lima, T. N. Veziroglub. A solar-wind hydrogen energy system for the Ceara' state – Brazil. Department of physics, State University of Ceara', Fortaleza, CE 60740-000, Brazil bClean Energy Research Institute, University of Miami, Coral Gables, FL 33124, USA. *International Journal of Hydrogen Energy* 33 (2008).
- K. Sadeghzadeh, M. B. Salehi. Mathematical analysis of fuel cell strategic Technologies development solutions in the automotive industry by the TOPSIS multi-criteria decision making method. Department of Industrial Engineering, Sharif University of Technology, Iran 2010. *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (2011).
- R. K. Ahluwalia, J. K. Peng, T. Q. Hua. Bounding material properties for automotive storage of hydrogen in metal hydrides for low-temperature fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 39 (2014).
- S. Voss, R. Steinbru, M. Kautz, E. Schießwohl, M. Arendt, J. T. Felde, J. Volkert, D. Trimis. Premixed hydrogen-air combustion system for fuel cell systems. *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (2011).
- J. Liu, S. Laghrouche, F. Ahmed, M. Wack. PEM fuel cell air-feed system observer design for automotive applications: An adaptive numerical differentiation approach. *International Journal of Hydrogen Energy* 39 (2014).
- B, Abderezzak, B. Khelidj, M. T. Abbes. Modeling charge transfer in a PEM fuel cell using solar hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* 39 (2014).
- Sonntag, Richard Edwin; Borgnakke, Claus. Introdução à termodinâmica para engenharia. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. XIV, 381 p.
- M. J. Moran, H. N. Shapiro. Princípios de Termodinâmica para Engenharia - 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009, 800 p.
- Brasil, Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Processo de produção de hidrogênio. Relatório Descritivo. Rio Grande do Sul, 2008. 20f.
- HOLLAND, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- <http://img.olx.com.br/images/75/759527031776292.jpg> consultado em 12 dezembro de 2016.
- [http://www.hydrogens.com.br/images/diagram-efie\\_corrig\\_comPWM.jpg?534](http://www.hydrogens.com.br/images/diagram-efie_corrig_comPWM.jpg?534) consultado em 20 novembro de 2016.

## NOTAS

- <sup>1</sup> Coordenador da pesquisa. Docente do Centro Universitário Newton Paiva
- <sup>2</sup> Discentes do curso de engenharia química do Centro Universitário Newton Paiva
- <sup>3</sup> Discentes do curso de engenharia mecânica do Centro Universitário Newton Paiva