

# BANCADA EXPERIMENTAL PARA ESTUDO DE COMBUSTÃO CATALÍTICA EM MEIOS POROSOS

Bruno Paes Sprícigo\*

## RESUMO

Visando um objetivo de colaborar com uma das principais problemáticas sofrida pela indústria automotiva – a poluição atmosférica, e como possível consequência, alcançar novos níveis de aproveitamento do etanol e hidrogênio, este trabalho desenvolveu uma bancada experimental para testes de combustão catalítica em meios porosos. O reator utiliza uma espuma cerâmica dentro de um tubo de aço inoxidável mantidos em temperatura elevada por um forno que possibilita o controle da temperatura. Utiliza-se um bico injetor automotivo para o abastecimento de combustível dentro de um misturador que também recebe ar proveniente de um compressor de ar. Esta mistura então aquece e queima ao escoar pela região porosa. As vazões de ar e combustível são controladas por um medidor e um software, respectivamente, pois se precisa de valores precisos para alcançar a razão de equivalência desejada. Testes preliminares indicam que a bancada experimental proporciona evaporação do etanol e subsequente mistura com ar antes da mistura reagente alcançar o reator. No futuro a bancada será validada com simulações no software *Chemkin*, e utilizada para estudos de reforma catalítica de etanol para produção de hidrogênio.

Palavras-chave: Combustão catalítica em meio poroso. Reforma Etanol.

\* Estudante do curso de Bacharelado Interdisciplinar em Mobilidade - Veicular da Universidade Federal de Santa Catarina. Email: bruno@spricigo.com

## 1 INTRODUÇÃO

O meio ambiente hoje sofre com os efeitos da poluição atmosférica por gases poluentes provenientes de diversos vetores tais como indústrias, fábricas, lixos domésticos e industriais, criações de gado e - um dos grandes vilões, responsável por 40% da poluição atmosférica nas grandes cidades - os veículos automotores. Nos últimos tempos, a indústria automotiva tem enfrentado um cenário crítico e crescente pela busca por fontes de energia limpas e renováveis, desenvolvendo diversos estudos no âmbito do etanol e hidrogênio - dois importantes combustíveis renováveis que podem ser a salvação para um novo século sustentável.

O etanol, sendo um combustível renovável, já é amplamente utilizado em diversos países como Brasil, Estados Unidos e países da União Europeia, cuja meta é de misturas com 10% de combustíveis renováveis para o ano de 2020. (EUROPEAN COMMISSION, 2009). O etanol pode ser utilizado em misturas em diferentes níveis e também é uma potencial alternativa para substituir a gasolina nos motores de combustão interna, pois tem um nível de emissões mais baixo e pode ser produzido de diversas formas. (CARA, et al, 2008). No Brasil a utilização de motores do ciclo Otto que conseguem se adaptar aos dois combustíveis são denominados comercialmente motores flex. Porém motores puramente a gasolina e motores puramente a etanol tem diferenças, ainda que pequenas, que precisam ser levadas em conta. Os motores a gasolina, de modo geral, utilizam taxas de compressão mais baixas para evitar a autoignição do combustível, já os motores a etanol trabalham com uma taxa mais elevada, então para que o motor possa se adaptar aos dois combustíveis ele deve possuir valores intermediários de taxa de compressão. Essa é apenas uma das diferenças entre os motores que utilizam combustíveis puros à qual os motores flex precisam se adaptar, deixando claro que o motor não é otimizado para nenhum dos dois combustíveis.

O etanol não é um produto encontrado de forma pura na natureza. A forma mais simples e comum de obtê-lo é a partir da fermentação das moléculas de açúcar encontradas em vegetais como cana-de açúcar, milho, beterraba, batata, trigo e mandioca. Existem ainda outras formas de produção de etanol como hidratação do etileno e redução do acetaldeído. Apesar da sustentabilidade e da facilidade de produção, o etanol encontra algumas barreiras para uma maior utilização em algumas localidades. Tais dificuldades podem ser o preço elevado, ou ainda, no Brasil, a sua produção que compartilha a matéria prima com a indústria de açúcar, a cana-de-açúcar.

Por causa do alto calor latente do etanol, motores movidos puramente com este combustível sofrem com uma perda de desempenho em partida a frio e condições de marcha lenta (SALES e SODRÉ, 2012), sendo esta outra barreira para sua comercialização em regiões e/ou épocas de baixas temperaturas. Por outro lado misturas de etanol e gasolina aumentam a taxa de oxigênio em sua queima e tendem a diminuir as emissões de CO e HC em partidas a frio se comparado a motores movidos puramente a gasolina. (IODICEA e SENATOREA, 2014).

Além do etanol, a demanda por hidrogênio como fonte de energia também cresceu muito na última década por ser um combustível extremamente leve, poderoso e amigável ao meio ambiente. Porém mesmo que o hidrogênio seja um dos elementos químicos mais abundantes na natureza, sua ausência em estado livre com valência zero (na forma H<sub>2</sub>) compromete sua utilização como combustível. (MIRONOVA et al, 2014).

Devido ao estado gasoso, baixa energia de ignição e velocidade extremamente alta de combustão, a adição de hidrogênio ajuda a promover a homogeneidade de carga dentro do cilindro e aumenta a combustão turbulenta. (TANG, ZHANG e HUANG, 2014). O hidrogênio também pode ser gerado por reforma do etanol, então os problemas com a produção e o armazenamento de hidrogênio podem ser resolvidos com algumas pequenas modificações nos veículos movidos a esse combustível. (MELCHOR-HERNÁNDEZ, GÓMEZ-CORTÉS e DÍAZ, 2013).

Métodos termoquímicos para produção de gás síntese rico em hidrogênio a partir do etanol incluem a reforma a vapor (1), a reforma auto térmica (2) e a oxidação parcial (3), e esta técnica trás vantagens ambientais pois utiliza biocombustíveis para produção do hidrogênio. A reforma do Etanol para produção de hidrogênio requer uma quantidade considerável de energia, como demonstrado na reação abaixo:



Estudos comprovaram que a produção de hidrogênio pela reforma de vapor do etanol é termodinamicamente factível, havendo um aumento na atividade catalítica ao manter as amostras em uma temperatura de 973K por 20 minutos. (GRYAZNOV, 1986). Para aumentar

a produção de hidrogênio, deve-se aumentar a temperatura em que ocorre a reação, porém isto implica na criação de inúmeros subprodutos indesejados. (BION, DUPREZ e EPRON, 2012). Isto pode ser amenizado pela utilização da catálise em reatores de membrana, para os quais já existem alguns estudos dedicados que permitem a remoção seletiva do hidrogênio da zona de reação. (GRYAZNOV, 1986). Esta técnica permite a produção de hidrogênio com altos níveis de pureza (0.01% de impurezas), assim como, um maior rendimento do processo de reforma. (MIRONOVA, et al, 2014).

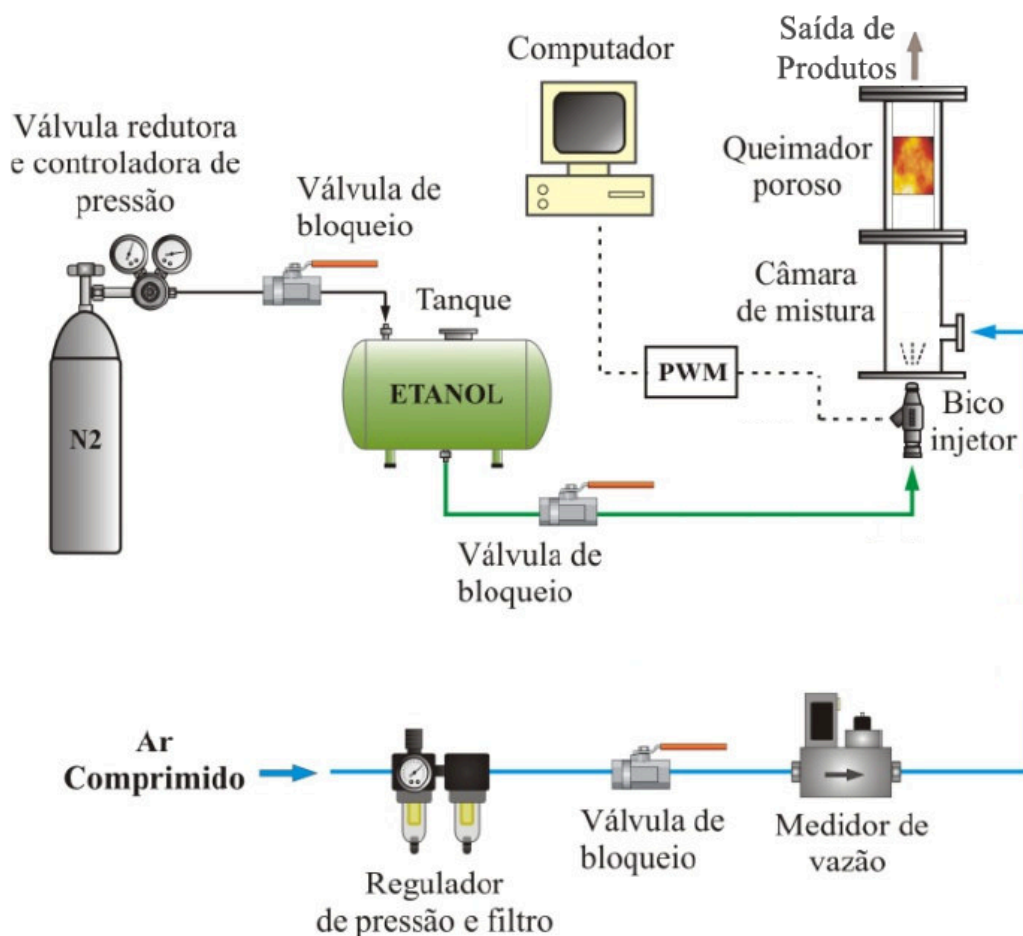
Neste contexto, a diminuição das reservas, o aumento do preço de combustíveis fósseis, assim como a criação de regulamentações ambientais cada vez mais rígidas levantam a questão dos combustíveis alternativos, por isso, o estudo das novas tecnologias e o aumento da eficiência dos motores atuais torna-se cada vez mais importante.

O objetivo deste trabalho é construir uma bancada experimental na qual seja possível estudar o comportamento em regime permanente e transiente da combustão catalítica de etanol com ar. Para este trabalho serão inicialmente feitos estudos apenas para validar a bancada, utilizando termopares para medir o comportamento transiente da temperatura dos produtos da combustão. A partir deste aparato poderão ser feitos estudos com diferentes razões de equivalência, assim como diferentes combustíveis e respectivas misturas.

## **2 APARATO EXPERIMENTAL**

A figura 1 apresenta um desenho esquemático da bancada experimental desenvolvida neste trabalho. O catalisador é suportado em uma espuma cerâmica de 10 ppi a 60 ppi. A espuma fica localizada dentro de um cilindro de aço inoxidável que será colocado dentro de um forno Flyever FE50RPN, no qual é possível obter uma zona uniforme de temperatura que será controlada através da central controladora do forno. Este forno se encontra dentro de uma capela de gases da marca Spencer contendo um exaustor que retira os produtos da combustão.

Figura 1: Esquema ilustrativo da bancada experimental



Fonte: Adaptado de MOSER, 2011.

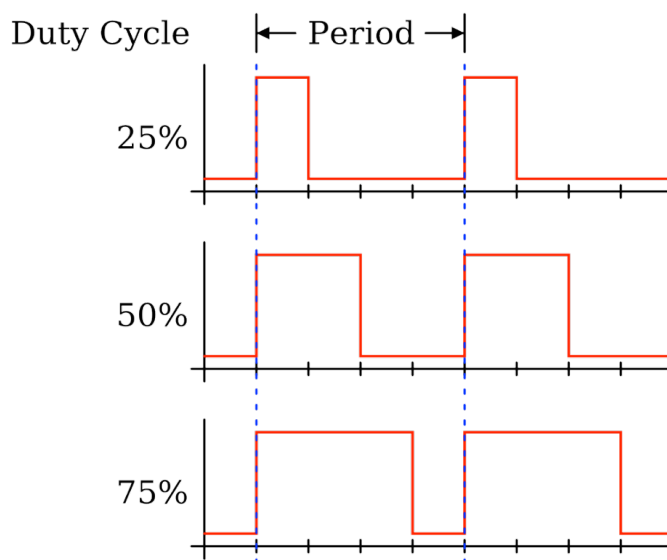
## 2.1 Alimentação de combustível

Em um primeiro momento a combustão catalítica será feita com uma mistura de Etanol (95% puro) e Ar. O armazenamento do combustível se dá em um tanque de aço inoxidável de aproximadamente 500 ml. Ligado ao topo do cilindro temos uma tubulação conectada a um cilindro de nitrogênio que tem a função de pressurizar o tanque. Uma válvula redutora e controladora de pressão está conectada na saída do cilindro de nitrogênio para que se mantenha uma pressão constante de 3.5 bar. É importante que esta pressão se mantenha para evitar variações na vazão de etanol. Como o combustível está na fase líquida e deve ser pulverizado para otimizar seu processo de queima, será utilizado um bico injetor automotivo da motocicleta Honda Biz 125cc.

Nos veículos que utilizam injeção eletrônica de combustível, o controle de abertura e fechamento do bico injetor se dá na ECU (Engine Control Unit) que é capaz de interpretar

dados de rotação do motor e posição dos pistões para liberar o combustível no momento correto. Nesta bancada, para que se mantenha um fluxo constante de Etanol, utilizou-se um controle por circuito eletrônico PWM (Pulse Width Modulation) previamente desenvolvido, que é operado através do LabView. O bico deve ser alimentado com uma tensão contínua de 12V para ser aberto e liberar a passagem de combustível, desta forma o circuito PWM é alimentado por uma fonte de tensão contínua de 12V e sua função é transformar esta tensão constante em uma onda quadrada através de chaveamentos. Uma das variáveis mais importantes do circuito é o *duty cycle*, que é a proporção entre o tempo em que o bico está aberto e o tempo em que está fechado. A figura 2 apresenta uma representação esquemática do cálculo do *duty cycle*.

Figura 2: Cálculo de *duty cycle*



Fonte: SAVAGE, 2008.

A interface do LabView nos permite ter um controle de *duty cycle* desta onda quadrada, desta forma pode-se controlar a vazão de combustível diretamente pela interface do software. No entanto, uma calibração deve ser executada para que se obtenha uma relação entre a vazão e o *duty cycle* do bico injetor. Este procedimento pode ser feito utilizando-se uma balança de precisão aferindo a quantidade de etanol após um determinado período de tempo em determinado *duty cycle*. Após aferir a massa de etanol em diversos pontos, pode-se interpolar uma curva característica do bico injetor para que sejam possíveis quaisquer valores de vazão. Este procedimento de calibração foi feito inicialmente com água no tanque reservatório para que se pudesse testar todos os componentes de alimentação de combustível.

Foram medidas massas de água contidas no recipiente após 30s de acionamento do bico injetor em determinados valores de *duty cycle*. Depois do procedimento com água, foi feita a calibração utilizando-se Etanol. Com a calibração do bico injetor efetuada e de posse da curva característica do mesmo pode-se calcular uma relação entre vazão de combustível e *duty cycle*. Esta vazão mássica pode ser determinada dividindo a massa de combustível despejada pela quantidade de tempo neste processo.

$$\dot{m} = \frac{\text{massa de combustível}}{30 \text{ segundos}} \quad (4)$$

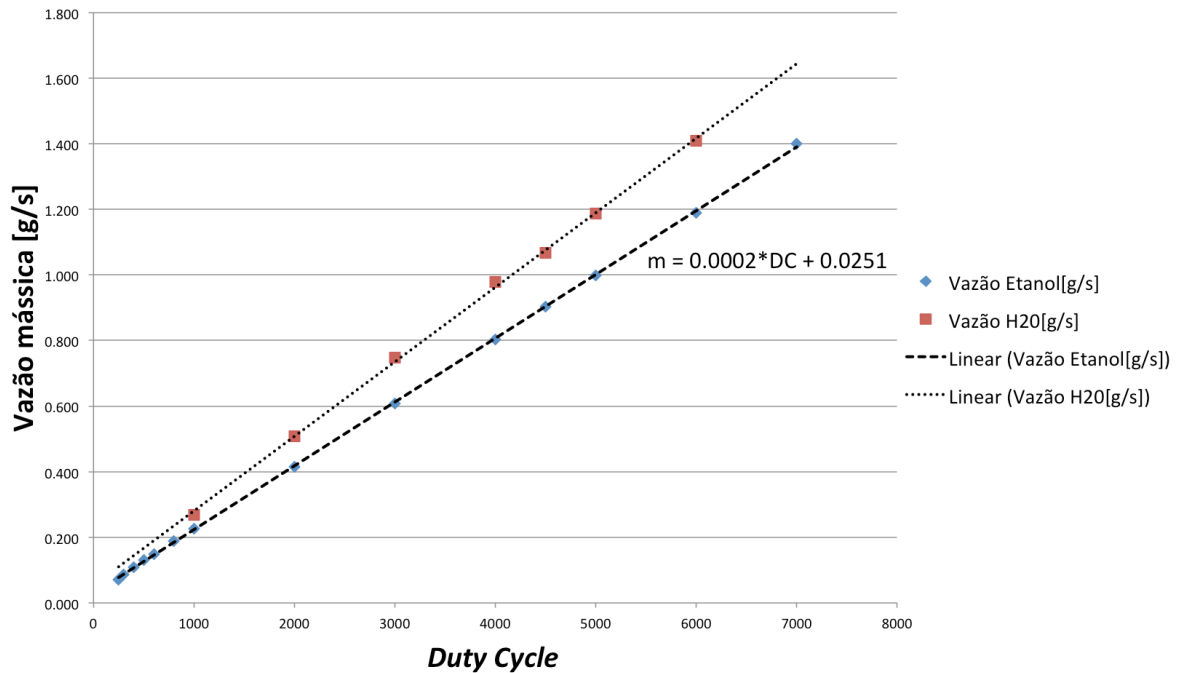
Uma rotina em EES foi escrita para calcular os valores de razões mássicas de ar e etanol em função da razão de equivalência requerida e da velocidade de escoamento no reator. O material suplementar apresenta o equacionamento utilizado no EES. Através de cálculos de razão de equivalência, foi estimada uma faixa de vazão necessária de Etanol entre 0,05 g/s e 0,36 g/s para que se respeitassem os limites de vazão máxima de ar de 10 l/min e vazão mínima de etanol de 0,05 g/s.

Figura 3: Tabela paramétrica do EES com os valores de vazão em função da razão de equivalência

Table 1					
1..10	1 $\phi$	2 $u_{ch}$ [cm/s]	3 $\dot{m}_{et,2}$ [g/s]	4 DC	5 $\dot{V}_{ar,2}$ [l/m]
Run 1	0,8	30	0,09947	372	11,88
Run 2	0,6	10	0,02487	-1	3,961
Run 3	0,6	20	0,04974	123	7,922
Run 4	0,6	30	0,07462	248	11,88
Run 5	0,6	40	0,09949	372	15,84
Run 6	0,6	50	0,1244	496	19,81
Run 7	1,5	10	0,06214	185	3,958
Run 8	1,5	20	0,1243	496	7,917
Run 9	1,5	30	0,1864	807	11,88
Run 10	1,5	40	0,2485	1117	15,83

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 1: Curvas que relacionam a vazão mássica com a posição do duty cycle



Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se obter graficamente uma equação linear do tipo  $y = ax + b$  que relaciona vazão mássica em função do *duty cycle*.

Equação obtida pelo método experimental de calibração:

$$\dot{m}_{etanol} = 0,002 * DC + 0,0251 \quad (5)$$

## 2.2 Alimentação de ar

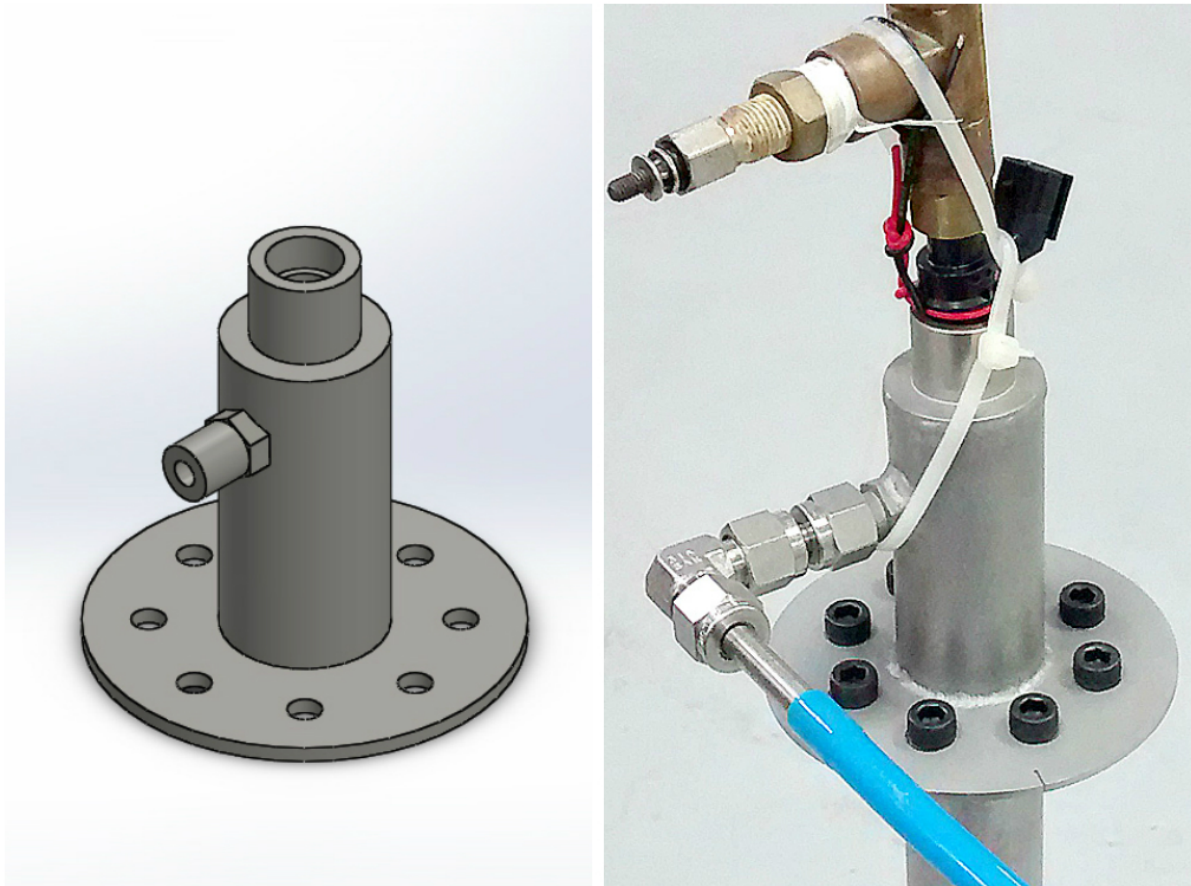
A fonte de ar para a combustão é um compressor de ar da marca Schulz com capacidade para fornecer  $4.72 \text{ l/s}$  e uma pressão máxima de  $9,7 \text{ bar}$ . A pressão da linha é reduzida para  $2 \text{ bar}$  através de uma válvula do tipo Lubrifil da marca Morbach que controla a pressão e retira óleo do ar, no caminho até a bancada existem ainda uma válvula de bloqueio do tipo esférica, uma válvula de controle de vazão e um filtro de linha para garantir que o ar utilizado na combustão seja o mais puro possível. A vazão de ar é medida através de um medidor da marca Alicat Scientific com faixa de medição de 0 a  $10 \text{ l/min}$ .



### 2.3 Misturador

Um misturador foi projetado e construído afim de otimizar a mistura de ar comprimido com o etanol pulverizado. Suas dimensões foram determinadas a partir da dimensão do bico injetor e da flange de encaixe com o tubo de inox, o qual é colocado dentro do forno. O misturador foi construído de aço inoxidável para que seja mais resistente às tensões e deformações, sofrendo menos com o risco de vazamento da mistura etanol / Ar. A figura 4 apresenta uma imagem do misturador projetado neste trabalho montado com o bico injetor e a conexão com o ar comprimido.

Figura 4: Imagem do misturador desenvolvido neste trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

## 2.4 Experimento

Para os testes preliminares da bancada, o reator foi constituído de uma espuma cerâmica composta de  $Al_2O_3$  com 29mm de diâmetro e 20 mm de comprimento. Sua função é de promover a circulação interna de calor e pré-aquecer os reagentes através de uma matriz sólida porosa localizada na zona de combustão. Usualmente o queimador poroso é dividido em duas áreas com funções distintas, uma é chamada de região de pré-aquecimento (RP) que possui poros pequenos para evitar a propagação da chama e forçar a sua estabilização na seção seguinte que possui poros maiores, denominada de região de estabilização de chama (REC).

Outra variável importante é a razão de equivalência que é uma divisão entre a proporção entre massas de combustível e ar atuais e a proporção entre massas de combustível e ar ideais, chamada de mistura estequiométrica. Para valores de razão de equivalência maiores que 1 (um) a mistura é denominada rica, e para valores menores que 1 (um) a mistura é denominada pobre.

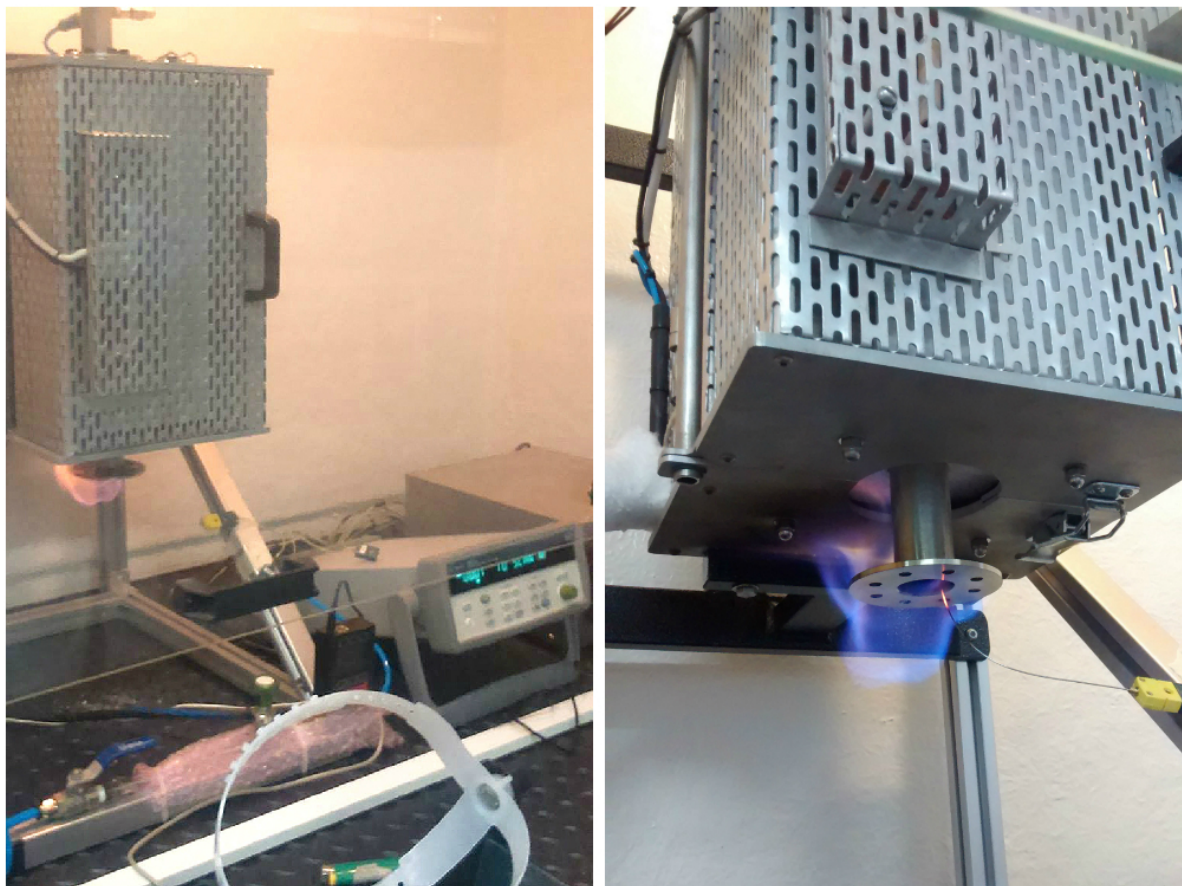
$$\phi = \frac{(\dot{m}_c/\dot{m}_{ar})_{Atual}}{(\dot{m}_c/\dot{m}_{ar})_{Estequiométrica}} \quad (5)$$

Dados de temperatura da mistura na entrada e na saída do tubo contendo o queimador poroso serão obtidos através de termopares do tipo K e processados em um sistema de aquisição de dados da marca Agilent e modelo 34972A e as temperaturas são monitoradas e registradas em um computador através do software HP BenchLink Data Logger, versão 3.1. Os dados de temperatura são monitorados durante um período determinado de tempo e dois gráficos de temperatura versus tempo serão gerados com dados da entrada e saída da mistura. Estes gráficos serão utilizados para estudar o tempo transiente de combustão.

## 3 RESULTADOS

A bancada experimental foi construída e segue em fase de testes. A figura 5 apresenta uma fotografia da bancada experimental desenvolvida e em operação.

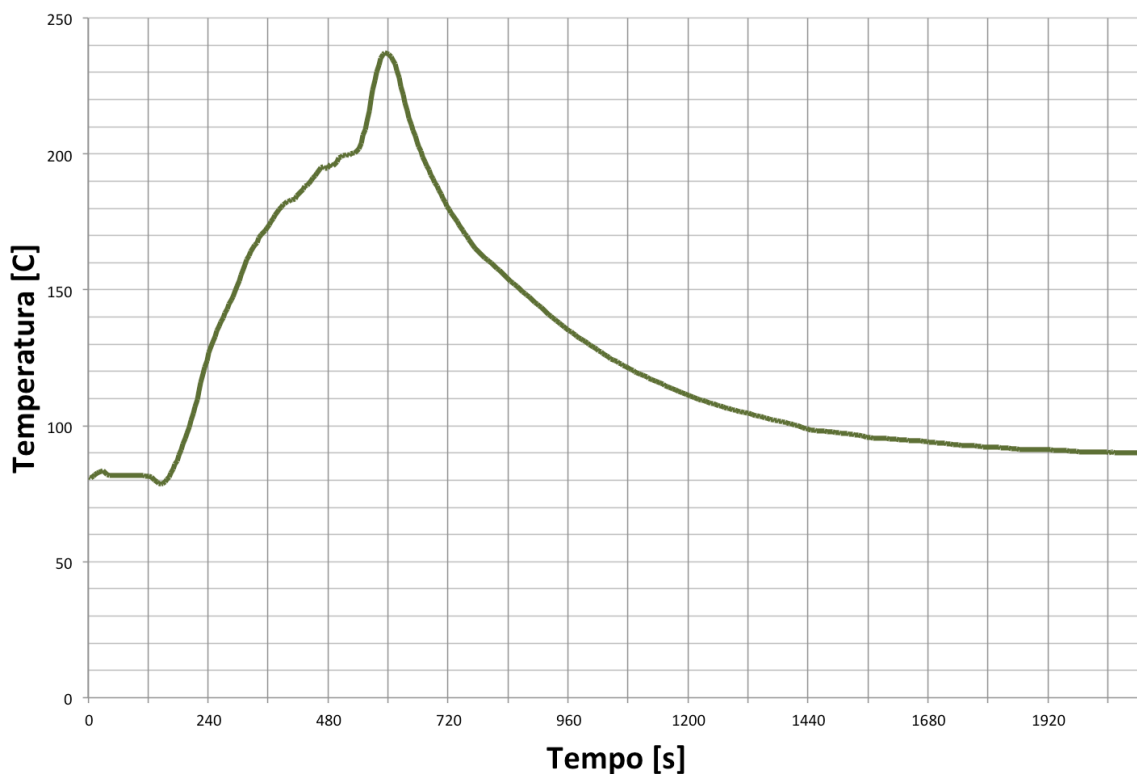
Figura 5: Imagem da bancada em funcionamento



Fonte: Elaborado pelo autor

A razão de equivalência de 0,8 foi a escolhida para iniciar a combustão com auxílio de uma chama piloto. Esta razão de equivalência deve ser mantida por um período de 2 a 3 minutos para estabilizar a chama, depois passando para valores de mistura pobre ou rica. Para um primeiro teste somente a razão de 0,8 foi utilizada com valores de *duty cycle* de 372 e vazão de ar de 11,88 *l/min*. A variação de temperatura neste primeiro teste foi monitorada através de um termopar do tipo K. O forno foi mantido em 250°C enquanto apenas ar fluía pelo reator, após uma hora o resultado foi uma temperatura estabilizada de saída do ar de aproximadamente 80°C. Ao adicionar o etanol e utilizar um isqueiro como chama piloto a temperatura começa a subir rapidamente. Aproximadamente 8,5 minutos depois os valores foram alterados para 400 de *duty cycle* e 8,0 *l/min*. Depois de um curto período de tempo a alimentação de combustível foi cessada e pode-se verificar o comportamento de resfriamento da espuma cerâmica. O gráfico 2 apresenta o perfil de temperatura registrado na superfície da espuma cerâmica no intervalo inicial de operação.

Gráfico 2: Variações de temperatura nos instantes iniciais com razão de equivalência 0,8



Fonte: Elaborado pelo autor

Nestes testes preliminares, a espuma cerâmica foi posicionada na parte final do tubo de inox. Isto permitiu a visualização da combustão sobre a cerâmica, situação importante para garantir a segurança. Um resultado importante observado é de que a configuração adotada de misturador acoplado ao forno com temperatura controlada foi capaz de promover a evaporação satisfatória do etanol. Adicionalmente, também contribuiu para a evaporação do etanol o longo tempo de residência da mistura etanol / ar dentro do cilindro aquecido pelo forno.

#### 4 CONCLUSÃO

Este estudo está em fase inicial e a bancada está ainda em fase de finalização, porém suas características mais importantes já foram mapeadas, entre elas a relação entre *duty cycle* e vazão mássica de etanol e valores de vazão de ar e etanol. Testes iniciais apontam um funcionamento da bancada e para uma razão de equivalência de 0,8 houve combustão com auxílio de uma chama piloto. Após a finalização da construção e de testes iniciais, dados de temperatura dos produtos de combustão serão extraídos para monitorar o comportamento

transiente da combustão em meios porosos. A evaporação do etanol foi considerada satisfatória nas condições utilizadas.

Esta bancada é importante no estudo da combustão de combustíveis em meios porosos em geral, visto que sua utilização não fica limitada a um único tipo de combustível. Também podem ser realizados estudos posteriores na área de recirculação de gases de escapamento (EGR) juntamente com produção onboard de Hidrogênio na tentativa de aumento de eficiência de motores a Etanol ou motores flex, possibilitando aumentos de potência, economia de combustível e diminuição das emissões de poluentes.

## REFERÊNCIAS

- BASILE A., et al. Hydrogen production by methanol steam reforming carried out in membrane reactor on Cu/Zn/Mg-based catalyst. **Catalysis Today**, n. 137, p. 17–22, 2008.
- BION N., DUPREZ D., EPRON F. Design of nanocatalysts for green hydrogen production from bioethanol. **ChemSusChem**, n. 15, p. 76–91, 2012.
- CARA C, et al. Production of fuel ethanol from steam-explosion pretreated olive tree pruning. **Fuel**, n. 87, p. 692–700, 2008.
- EUROPEAN COMMISSION. Renewable energy directive. Legislation. L 140. ed. Europa, 5 jun. 2009. v. 52. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L:2009:140:TOC>>. Acesso em: 20 out. 2014.
- GRYAZNOV V. M. Hydrogen permeable palladium membrane catalysts. **Platinum Metals Review**, n. 30, p. 68–72, 1986.
- IODICEA Paolo, SENATOREA Adolfo. Cold start emissions of a motorcycle using ethanol-gasoline blended fuels. **Energy Procedia**, n. 45, p. 809–818, 2014.
- MELCHOR-HERNÁNDEZ C., GÓMEZ-CORTÉS A., DÍAZ G. Hydrogen production by steam reforming of ethanol over nickel supported on La-modified alumina catalysts prepared by sol–gel. **Fuel**, n. 107, p. 828–835, 2013.
- MIRONOVA E. Yu., et al. Production of high purity hydrogen by ethanol steam reforming in membrane reactor. **Catalysis Today**, n. 236, p. 64-69, 2014.
- MOSER, Rafael Hafemann. ESTUDO DA COMBUSTÃO DE GÁS NATURAL, BUTANO E ETANOL EM MEIO POROSO PARA PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE. 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- SALES L. C. M., SODRÉ J. R. Cold start emissions of an ethanol-fuelled engine with heated intake air and fuel. **Fuel**, n. 95, p. 122–125, 2012.
- SAVAGE, Chris. Propeller Multicontroller Article Series. 2008. Disponível em: <[http://www.savagecircuits.com/content.php?78-Propeller-Multicontroller-Article-Series-\(4-Parts\)/view/5](http://www.savagecircuits.com/content.php?78-Propeller-Multicontroller-Article-Series-(4-Parts)/view/5)>. Acesso em: 20 out. 2014.
- SEELAM P. K., et al. Hydrogen production from bio-ethanol steam reforming reaction in a Pd/PSS membrane reactor. **Catalysis Today**, n. 19, p. 42–48, 2012.
- TANG C., ZHANG Y., HUANG Z. Progress in combustion investigations of hydrogen enriched hydrocarbons. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, n. 30, p. 195–216, 2014.
- ZHAO J., et al. Effects of compression ratio on the combustion and emission of a hydrogen enriched natural gas engine under different excess air ratio. **Energy**, n. 59, p. 658–665, 2013.