

COMBUSTÃO DO GÁS NATURAL EM PROTÓTIPO DE CALDEIRA NÃO-CONVENCIONAL DE QUEIMADOR POROSO

William M. Barcellos¹ e Luís Carlos O. Souza² – DEMP/UFC,
João J. Hiluy Filho³, Élton L. Q. Bananeira⁴ e Isaac H. V. Beserra⁵ – DEQ/UFC

¹ DEMP/CT/Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 714, CEP 60455-760 – william_barcellos@yahoo.com.br

² DEMP/CT/Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 714, CEP 60455-760 – duducastro@gmail.com

³ DEQ/CT/Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 709, CEP 60455-760 – hiluy@ufc.br

⁴ DEQ/CT/Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 709, CEP 60455-760 – eltonluisqb@gmail.com

⁵ DEQ/CT/Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 709, CEP 60455-760 – isflav@hotmail.com

O presente estudo trata do desenvolvimento de um novo conceito de caldeira não-convencional que é constituída de um queimador poroso, o qual promove um processo de combustão estável, com elevado nível de eficiência e baixas emissões. A onda de combustão, em um meio poroso, se propaga ao longo do comprimento do reator e seu deslocamento é estabilizado através de uma extração de calor controlada, associada a um sistema de fluxo reverso da mistura ar-combustível, o qual atravessa o queimador. Sob essas condições, o queimador desenvolve um perfil de distribuição de temperatura trapezoidal, o que confere um processo de combustão estável e uma boa extração de energia. Essa propriedade favorece uma queima estável de misturas ultra-pobres, operando em faixas muito abaixo dos limites de inflamabilidade, em relação aos equipamentos convencionais, resultando em baixa emissão dos gases poluentes. Os efeitos principais dos parâmetros de processo, tais como: a razão de equivalência e a velocidade do escoamento da mistura ar-combustível no reator; são analisados. Os estudos quanto à eficiência térmica do sistema, à estabilidade de combustão e às emissões da caldeira, são realizados com a caldeira fundamentalmente operando com o gás natural, com misturas ar-combustível ultra-pobres. O protótipo desenvolvido pode atingir eficiências térmicas próximas de 90%, produzindo níveis de emissões de NO_x e CO em torno de 2 ppm.

Palavras-chaves: 1. Combustão, 2. Meio Poroso, 3. Queimador Não-Convencional, 4. Caldeira Superadiabática, 5. Baixa Emissão de NO_x e CO_x

1. INTRODUÇÃO

Ao longo de todo o processo de desenvolvimento industrial, tem sido observado que diversas técnicas de engenharia estão sendo empregadas em caldeiras, e sistemas térmicos de combustão, para permitir a utilização dos combustíveis de hidrocarbonetos em menores níveis de consumo, motivado pela necessidade de redução da demanda, como também, dos impactos que os processos de combustão causam sobre o meio ambiente. Nesse sentido, a proposta de se desenvolver um protótipo de caldeira não-convencional, que emprega uma nova tecnologia em termos de combustão, com a utilização de um queimador poroso, pode representar uma boa iniciativa para criação de novos sistemas térmicos, de aquecimento de água e de processo e, também, de sistemas de geração de energia elétrica; com o objetivo de se conseguir maior eficiência e melhores níveis de emissões de poluentes em relação aos sistemas convencionais.

Nesse estudo em questão, está sendo implementada, para a construção desse novo modelo de caldeira a vapor aquatubular, a tecnologia da “Combustão em Meios Porosos” (CMP), com o objetivo de estenderem-se consideravelmente os limites de inflamabilidade. Especificamente, deseja-se queimar misturas ar-combustível com teor de calor ultrabaixo, mantendo-se, entretanto, uma excelente estabilidade de reação, o que seria impossível em queimadores convencionais. De um modo geral, os queimadores pré-misturados utilizam controles complexos para restringir as emissões. Alternativamente, a CMP favorece um projeto simples de reator que promove a formação típica de um perfil de temperatura trapezoidal centralizado no queimador, operando no regime superadiabático para misturas ultra-pobres. Essas propriedades resultam em baixa temperatura-característica menor que 1600 K, que propicia emissões ultra-baixas de NO_x e CO, segundo “Kennedy *et al.*, 1995a, 1995b”. Operando com metano técnico (teor de 98% a 99% de pureza), valores de emissão inferiores a 2 ppm de NO_x e de CO foram obtidos nesse novo conceito de caldeira, o que pode justificar o desenvolvimento desse protótipo, considerando que esse valor antecipadamente atende aos requisitos internacionais futuros, que tem sido exigidos aos grandes fabricantes de caldeiras, baseado em “Littlejohn *et al.* (2002)”.

Em geral, a extração de energia do processo de combustão tem sido a tônica dos projetos de caldeiras e, em particular, as caldeiras constituídas de queimadores porosos têm mostrado que o processo de transferência de calor é muito eficiente, devido à matriz porosa, segundo “Xiong *et al.* (1995)”. A presença de uma fase sólida de alta condutividade e alta capacidade térmica possibilita a combustão porosa ocorrer nas vizinhanças dos trocadores de calor. A matriz porosa é capaz de reter o calor produzido pela reação e transferi-lo para o corpo frio (trocador de calor), melhorando de modo indireto, a eficiência da extração de calor da zona de combustão.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O campo do estudo da CMP é relativamente novo, sendo esperado uma evolução nos dois aspectos qualitativos em termos de desenvolvimento de pesquisa, ou seja, a pesquisa básica ou fenomenológica e a pesquisa aplicada.

2.1 - Pesquisas Básicas

As tendências das pesquisas, no que diz respeito ao estudo dos aspectos fenomenológicos presentes na combustão em meios porosos, têm sido no sentido de abordar um pouco mais sobre as questões que envolvem o processo de propagação da onda de combustão e os fenômenos internos de transferência de calor dentro do reator, com base em “Hoffmann *et al.* (1993)”. Como um processo internamente auto-organizado de recuperação de calor, a combustão de misturas ar-combustível pré-misturadas em meio poroso, difere significativamente da chama homogênea. Esta diferença pode ser atribuída a dois principais fatores: a superfície interna altamente desenvolvida do meio poroso, que resulta em eficiente transferência de calor entre o gás e o sólido, e o processo de mistura intensa durante o escoamento dos gases no meio poroso que aumenta a difusão efetiva na fase-gás.

Uma intensa transferência de calor intersticial proporciona um baixo grau de não-equilíbrio térmico entre a fase-gás e a fase-sólida, resultando em acoplamento da onda térmica com a de reação. Esta situação geralmente corresponde a um baixo regime de velocidade de propagação da onda de combustão, de acordo com a classificação dada por “Babkin (1993)”.

Nesse campo de conhecimento é comumente empregado tratamentos diferenciados para os sistemas em regimes estacionários e transientes. O primeiro sistema é amplamente adotado em queimadores radiantes e aquecedores de superfície, devido à alta emissividade radiante do sólido. Aqui, a zona de combustão é estabilizada no elemento finito de uma matriz porosa pelas condições de contorno impostas. Esta área inclui os queimadores radiantes porosos e o sistema aquecedor-combustor de superfície, com a idéia de extração de calor dos gases quentes de combustão. O sistema transiente pode ser tratado pela teoria da frente de chama com excesso de entalpia, onde uma zona de reação transiente desenvolve uma propagação livre, como onda de combustão, no sentido contrário ao fluxo da mistura ar-combustível, ou no mesmo sentido do escoamento, devido ao fluxo de energia negativa ou positiva. A idéia de frente de chama com excesso de entalpia foi proposta a mais de 40 anos por “Egerton *et al.* (1963)” e reiterada mais tarde por “Weinberg *et al.* (1988)” do Imperial College e “Takeno *et al.* (1980)”, tendo o raciocínio de que a temperatura de combustão em um sistema pode ser mais alta do que a temperatura adiabática teórica, se os produtos queimados pré-aquecerem os reagentes, segundo “Hannamura *et al.* (1993)”. Em combustão de filtração transiente em meio poroso, o deslocamento relativo da zona de combustão resulta em fluxo de energia positivo ou negativo entre os reagentes e a matriz sólida inerte “Barra *et al.* (2003) e Kaviany (1995)”. Como resultado, as temperaturas de combustão observadas podem ser significativamente diferentes das predições adiabáticas e são controladas principalmente pela química da reação e pelo mecanismo de transferência de calor.

Então, o estudo teórico da CMP tem mais especificamente se restringido à questão de se lidar com o comportamento transiente da frente de chama, que pode viajar em sentidos opostos dependendo da razão de equivalência e, também, da velocidade do escoamento da mistura gasosa atravessando o meio poroso “Hackert *et al.* (1999); Hsu e Matthews (1993); Kennedy *et al.* (1995a)”. O recente emprego de um fluxo reverso tem sido o diferenciador nessa área de pesquisa, pela grande estabilidade conseguida na reação. A vantagem de inserir uma matriz sólida inerte dentro da zona de combustão é justamente a recuperação de energia liberada pela reação. Por essa razão, o sentido do fluxo da mistura ar-combustível tem que ser periodicamente revertido para a estabilização da zona de combustão no reator de comprimento limitado. Um queimador de fluxo reverso proporciona essa oscilação periódica da onda de combustão. Os períodos de oscilação são baseados na estabilidade do processo de combustão, na distribuição de temperatura e na capacidade de manter uma boa estocagem de energia.

2.2 - Pesquisas Aplicadas

O desenvolvimento das pesquisas aplicadas no campo de estudos da CMP está intrinsecamente ligado à criação de tecnologias que desenvolvam sistemas térmicos e/ou equipamentos de processo. Classicamente, a combustão de filtração superadiabática tem sido um elemento de grande emprego na indústria, principalmente para desenvolvimento de queimadores radiantes “(Rummingner *et al.*, 1996) e (Tong e Sathe, 1991)” . Novas propostas de pesquisa para desenvolvimento de sistemas térmicos de aquecimento têm aparecido nos últimos 7 a 10 anos, apresentando-se como muito promissoras pelos resultados preliminares alcançados, segundo “Contarin *et al.* (2003a)”. Dentre as áreas de pesquisa aplicada que tem despontado recentemente, destacam-se:

2.2.1 - Caldeiras Superadiabática de Fluxo Reverso

O recente desenvolvimento de caldeiras e aquecedores de alta eficiência e baixíssimo nível de emissão de poluentes, com a aplicação da tecnologia da CMP, tem demonstrado a vantagem de se utilizar a técnica do fluxo

reverso da mistura ar-combustível, com base nos resultados em termos de emissões e estabilidade de reação. Em especial, o grupo de pesquisa do *Energy Systems Laboratory* da *University of Illinois at Chicago*, desenvolveu uma caldeira de alta eficiência e baixíssimos índices de emissões de NO_x e CO, aproximadamente 1 ppm e 0.5 ppm, respectivamente, para razões de equivalência menores que 0.5, com base no trabalho de “Barcellos *et al.* (2003)”.

2.2.2 - Geração de hidrogênio a partir da queima do gás natural.

A oxidação parcial de combustíveis formados por hidrocarbonetos pesados é uma linha de pesquisa que tem sido bastante desenvolvida em vários países para síntese de hidrogênio. Entretanto, a tecnologia de produção de hidrogênio, a partir da aplicação do método de oxidação parcial, apresenta-se como um recurso para se trabalhar com hidrocarbonetos leves, que é o caso do gás natural, podendo esse processo ser realizado em um meio inerte ou catalítico. Em queimadores porosos, o nível de temperatura de operação fica normalmente entre 1000 e 1400°C, dependendo da razão de equivalência e da velocidade do escoamento da mistura, o que tem favorecido obtenção de eficiências superiores a 65%, a partir de “Drayton *et al.* (1998)”.

Um outro método de produção de hidrogênio tem sido o estudo da reforma auto-térmica de hidrocarbonetos leves, em que o principal enfoque tem sido o gás natural. Esse método, em princípio, é a combinação dos dois métodos, a oxidação parcial e a reforma por vapor, num mesmo reator. Os pesquisadores têm utilizado nos queimadores constituídos de materiais catalíticos para promover a oxidação parcial, associada à reforma por vapor. Entretanto, os queimadores preenchidos de material cerâmico inerte têm conseguido altas eficiências de conversão, com base em “Bingue *et al.* (1998)”.

3. METODOLOGIA

3.1 Equações Governantes

O queimador volumétrico de fluxo recíproco com extração de energia, que está sendo aplicado no desenvolvimento desse protótipo de caldeira em estudo, foi preliminarmente objeto de uma investigação numérica que focou a análise do processo de combustão e as emissões produzidas no reator poroso, análise essa realizada por “Contarin *et al.* (2003b)”. Esse reator investigado tem concepção de projeto semelhante ao dessa caldeira em desenvolvimento, servindo, então, como base para sua construção. O modelo numérico elaborado compôs esse trabalho de desenvolvimento do protótipo da caldeira, e vários dados obtidos com a experimentação do reator investigado puderam ser utilizados como referência para essa pesquisa. Por essa razão, neste item do presente artigo, estão sendo apresentadas apenas as equações que determinam a eficiência da extração de energia do protótipo da caldeira desenvolvido.

Como pode ser observado no item que trata do aparato experimental, apresentado na seqüência do relato deste artigo, empregou-se um par de trocadores de calor em cada uma das extremidades da matriz porosa, para remover calor liberado pela combustão em cada uma das seções da caldeira, gerando assim um novo tipo de caldeira aquatubular não-convencional. O fluxo de gases quentes vindos da zona central localizada no platô central aquece os trocadores de calor instalados na extremidade do reator a jusante do platô. Ao mesmo tempo, a mistura fresca entrando no queimador resfria os trocadores de calor da outra extremidade da caldeira, ou seja, a montante do platô.

Com base no exposto acima, a potência média extraída pelos trocadores de calor foi definida como o produto da taxa de fluxo global de massa de água que alimenta ambos trocadores pelo calor específico da água a pressão constante, e pela variação de temperatura entre a entrada e a saída da caldeira; mais o calor latente obtido da mudança de estado da água. Isso está expresso na seguinte equação:

$$\bar{P}_{extr} = (\dot{m} c_p \Delta T + \dot{m} \cdot \chi \cdot h_{fg})_{H_2O}$$

A potência extraída foi determinada através do cálculo da diferença de entalpia na entrada e na saída da caldeira, como parte da energia disponível da combustão. Essa diferença de entalpia é proporcional ao somatório da energia extraída pelos trocadores de calor mais as perdas de calor pelas paredes do reator, expressada pela equação a seguir:

$$\Delta H_{Cald} = (\dot{m} c_p \Delta T + \dot{m} \cdot \chi \cdot h_{fg})_{H_2O} + \int_0^{500} \dot{q}_{paredes} dx$$

A eficiência de extração de calor foi determinada como a razão entre a potência média transferida para o fluxo de água nos trocadores de calor e a potência química provida pelo combustível, que está expressa pela seguinte equação:

$$\eta_{extr} = \frac{\bar{P}_{extr}}{P_{quim}}$$

onde a potência química é proporcional ao produto da taxa de fluxo de massa de combustível pelo seu poder calorífico inferior (PMI), sendo expresso pela equação a seguir:

$$P_{quim} = (mPMI)_{CH_4}$$

3.2 Aparato Experimental

O protótipo da caldeira a vapor em estudo, construído em escala de laboratório, basicamente consiste de um queimador poroso com trocadores de calor inseridos no berço poroso, como mostra a Fig.1, o qual funciona mediante um fluxo recíproco de mistura ar-combustível. O núcleo desse queimador poroso é constituído de um tubo de quartzo ($L = 500$ mm, $DI = 76$ mm), preenchido com esferas de alumina (Al_2O_3) de aproximadamente 5,5 mm de diâmetro, criando uma porosidade de 40%, em média. Por esse berço, atravessa a mistura ar-combustível ao longo de todo seu comprimento, sendo revertida periodicamente a partir de um ciclo de tempo pré-estabelecido. Um sistema de alimentação contínua de água mantém um fluxo nos trocadores de calor instalados em ambas as extremidades da caldeira que, além de produzir vapor, confina a reação no espaço limitado entre os trocadores, na região central. Em ambas as extremidades do reator, dois flanges de alumínio retêm o meio poroso dentro do tubo de quartzo, que é isolado termicamente com uma camada espessa de material isolante.

A ignição da mistura dentro do queimador é realizada por um sistema elétrico de pré-aquecimento que aquece o berço poroso, desde a temperatura ambiente até a temperatura de ignição da mistura ar-metano estequiométrica, que corresponde a aproximadamente 1200 K. Esse sistema de aquecimento é constituído de um fio resistivo que é enrolado ao longo de todo comprimento do tubo de quartzo de forma a aquecer diretamente o meio poroso através da parede de quartzo, sendo todo o conjunto (tubo-espiras de fio resistivo) isolado juntamente.

Alguns sensores e atuadores eletrônicos são utilizados para sincronizar a reversão do fluxo da mistura ar-combustível com a vazão de água nos trocadores de calor, mantendo uma condição estável de operação.

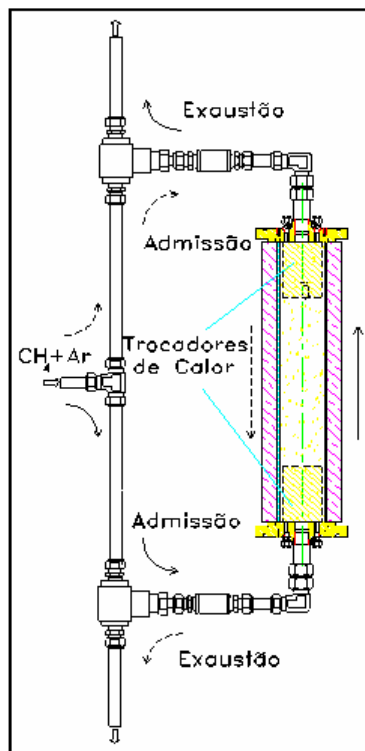


Fig1 – Esquemático do protótipo da caldeira

Sendo o desempenho da caldeira dependente da razão de equivalência (Φ) e da velocidade do escoamento dos gases (v_g), ou melhor, da mistura ar-combustível, é necessário medir precisamente ambos os parâmetros de operação. Os valores de velocidade de escoamento dos gases experimentados estão baseados em análise teórica da combustão, considerando a onda de propagação através do berço poroso. Experimentalmente, as velocidades selecionadas foram 0,2 e 0,3 m/s, sob uma faixa de razões de equivalência entre 0,2 e 1,0.

A difusão do fluxo de combustível ao do ar é realizada ao longo do comprimento da tubulação, o que conferiu um bom processo de mistura. O sistema de fluxo recíproco da mistura ar-combustível consiste de dois tubos de entrada e saída do reator ligado a duas válvulas 3-vias, através de uma de suas portas. Uma outra porta de cada válvula é conectada à linha de mistura fresca e a outra restante para a linha de gases de exaustão, tal que alternando a válvula de 3-via reverte o fluxo. Essas válvulas são acionadas por uma válvula eletro-pneumática,

mantendo a pressão do ar da linha de alimentação dos atuadores pneumáticos. Essa eletro-válvula é controlada por um timer, em que um período de alternância é especificado. Esse período foi determinado a partir de um estudo experimental anterior sobre a estabilidade do processo de combustão, sobre a distribuição de temperaturas e sobre a capacidade de manter uma boa estocagem de energia.

A Fig. 2 apresenta um esquemático do sistema pneumático de reversão da mistura ar-combustível e, também, um arranjo dos instrumentos utilizados no monitoramento do processo, indicando a ligação dos mesmos a um sistema de aquisição de dados.

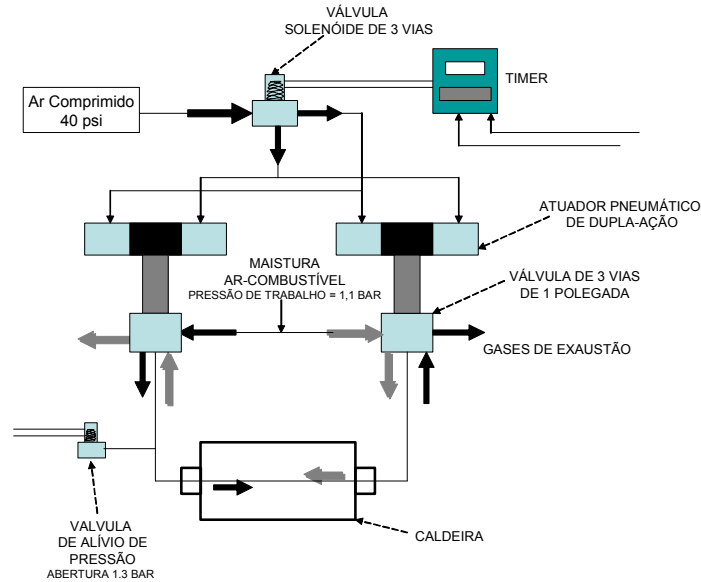


Fig.2 – Esquemático dos sistemas de reversão pneumática do suprimento da mistura ar-combustível

Algumas variáveis são monitoradas durante a operação do reator, tais como: i) temperatura de combustão, em oito pontos espaçados linearmente ao longo do eixo do reator; ii) temperaturas de entrada e saída da água dos trocadores de calor; e iii) temperaturas dos gases de admissão e de escape; e também a fração molar de NO_x e CO .

A temperatura de combustão é medida por oito termopares do tipo S e estão alojados em uma fina haste de alumina que contém furos longitudinais de 1 mm cada, aproximadamente, sendo essa haste posicionada na linha de centro do reator.

A temperatura do vapor é medida com boa precisão e pequenas flutuações de valores ($\pm 3\text{K}$) são observadas. A temperatura do vapor é um dos parâmetros usados para cálculo da eficiência do reator e, considerando a estreita faixa de variação de temperatura, um sistema de detectores de temperatura de resistência (RTD) foi empregado.

Todos os sinais de saída dos instrumentos são digitalizados por um sistema da “National Instrument” (LabView-Compact FieldPoint cFP2020). Ele mostra como saída de dados: a distribuição de temperaturas dentro do reator, a temperatura dos gases de admissão e escape, temperaturas da água etc., sendo que amostras dessas variáveis monitoradas são salvas em arquivo a cada 5 segundos.

As emissões de NO e NO_2 são medidas com um analisador de quimiluminescência e as emissões de CO são determinadas por um analisador de infravermelho. As leituras de ambos analisadores, realizadas com os demais instrumentos, são transformadas para sinais analógicos-padrão que são digitalizados por um sistema analógico, que apresenta e registra as amostras a cada 10 seg.

O sistema de suprimento de água desse protótipo de caldeira consiste de válvula solenóide, válvulas de regulagem, reguladores de pressão e instrumentos dedicados a medir a vazão do escoamento, a pressão e a temperatura. A água é suprida independentemente para cada seção do reator (nas extremidades superior e inferior) a uma pressão de referência de 500 kPa. O consumo de água da caldeira é precisamente medido através de um sensor eletrônico de fluxo, que faz a leitura por sinais de frequência, que são proporcionais às velocidades de escoamento da água. A pressão do sistema é mantida constante, usando um regulador de pressão a montante, instalado na tubulação de saída da caldeira, após junção dos tubos de vapor de cada extremidade da caldeira. A temperatura média da água nos circuitos de entrada e saída são aproximadamente 281 K e 425 K, respectivamente. O protótipo produz vapor saturado na pressão de referência, mantendo uma boa estabilidade do processo de vaporização. A vaporização dentro dos trocadores de calor da caldeira apresenta uma forte influência sobre as emissões de CO . A Fig. 3 apresenta um esquemático do sistema de água/vapor instalado no protótipo da caldeira desenvolvido.

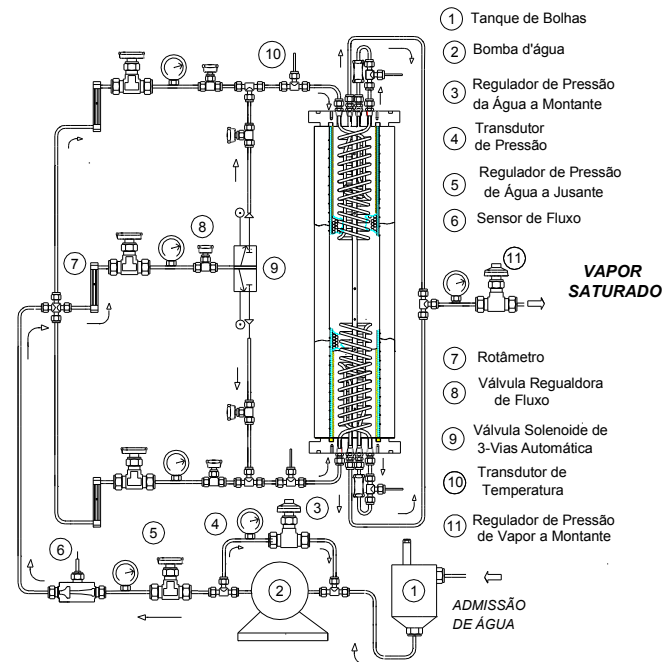


Fig. 3 – Esquemático do sistema de suprimento de água e descarga de vapor, apresentando os instrumentos de controle do sistema

Como pode ser observado, esse novo tipo de caldeira de vapor, em verdade, contém duas caldeiras em um único queimador. Entretanto, ambas as seções de caldeiras (superior e inferior) são conectadas através de uma única tubulação de saída para produção de vapor.

3.3 Operação da Caldeira

Com o objetivo de melhor descrever o processo de operação do protótipo desenvolvido é conveniente começar pela condição de caldeira totalmente fria. Seu processo de aquecimento para obter a temperatura ideal de ignição da mistura ar-combustível depende do sistema elétrico de pré-aquecimento, que é empregado para aquecer o meio poroso até uma temperatura superior a 1200 K, a qual corresponde à temperatura de ignição do metano. Tão logo o pico de temperatura seja atingido em qualquer ponto do meio poroso, uma determinada velocidade de mistura ar-combustível e uma certa razão de equivalência desejada são, então, implementadas para que o processo de combustão seja automaticamente iniciado. A distribuição de temperatura assume gradativamente uma forma trapezoidal, em que dois picos de temperatura começam a crescer nos vértices superiores do perfil delineado, correspondentes à localização das zonas de combustão, para uma determinada direção do escoamento dos gases.

A fim de se conseguir a estabilidade do processo de combustão e, também, do processo de vaporização, a caldeira deve funcionar com um escoamento de água adequadamente regulado para cada condição de operação. No sistema de alimentação de água, existe uma válvula solenóide que ora interrompe e ora deixa fluir água no seu interior, para alimentar uma ou outra seção da caldeira, de forma a suprir adequadamente de água a seção onde o fluxo de calor é mais intenso.

Naturalmente, a distribuição de temperatura dentro do reator vai formando um perfil trapezoidal, em que os trocadores de calor contribuem fortemente para essa configuração. Observando o perfil de distribuição, verifica-se que a extração efetiva nas extremidades do reator resulta em um grande gradiente de temperatura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento desse protótipo evoluiu a partir de uma série de pesquisas antecedentes, que estão principalmente relacionadas à eficiência dos trocadores de calor e às propriedades da reação, em que foi focada uma combinação ideal com os resultados de emissões.

Os resultados experimentais apontam para a influência dos parâmetros importantes no projeto e na operação: a velocidade da mistura ar-combustível (v_2) e a razão de equivalência (Φ); sobre os perfis de temperatura, emissão e eficiência.

4.1 Influência da Razão de Equivalência no Perfil de Temperatura

O efeito da razão de equivalência no perfil de temperatura para uma determinada velocidade de escoamento dos gases é apresentado na Fig. 4. Experimentalmente, os resultados demonstram a influência da razão de equivalência nos perfis de temperaturas obtidos com a caldeira operando em uma velocidade de escoamento dos gases de 0.30 m/s.

A extração de calor é realizada variando as razões de equivalência de misturas ar-combustível ultra-baixas ($0,2 \leq \Phi$) até a mistura estequiométrica ($\Phi \leq 1,0$). O gráfico mostra que o platô de temperatura se estende e o pico de temperaturas aumenta com razões de equivalência crescentes. Também, é demonstrado no gráfico que o perfil de temperatura trapezoidal é uniforme e guarda certa simetria em relação à seção transversal do centro do reator, além disso, mostra que os gradientes térmicos laterais são grandes.

Observando a Fig. 4, verifica-se que, conforme o valor de Φ aumenta, o perfil de temperatura na parte central do reator evolui de um pequeno para um grande platô, com dois picos de temperatura. Aumentando o coeficiente das perdas de calor para as vizinhanças diminui a temperatura no ponto central do reator.

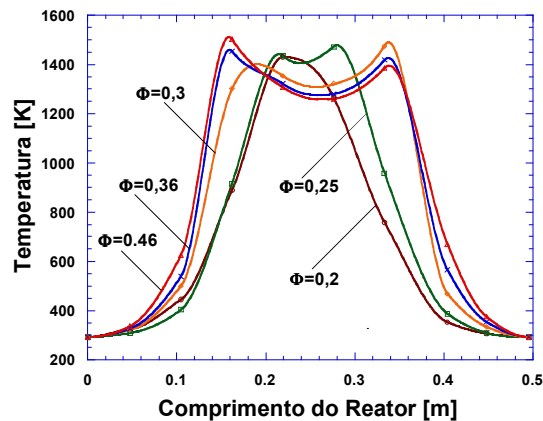


Fig. 4 – Influência da razão de equivalência sobre o perfil de temperatura

4.2 Influência da Velocidade de Escoamento dos Gases

Observando a Fig. 5 verifica-se que os valores máximos dos perfis de temperatura aumentam significativamente conforme a velocidade do escoamento dos gases aumenta, mantendo uma evidente proporção entre os perfis. Variando a velocidade da mistura ar-combustível entrando no reator de 0,2 m/s e 0,3 m/s, a temperatura máxima de combustão varia de 1300 K a 1450 K (aproximadamente).

Um pequeno aumento do platô de temperatura significa um forte aumento na estocagem de energia e, conseqüentemente, elevada transferência de calor para os trocadores. Apesar do bom processo de transferência, aumentando a velocidade do escoamento dos gases, verifica-se um maior valor de temperatura de exaustão.

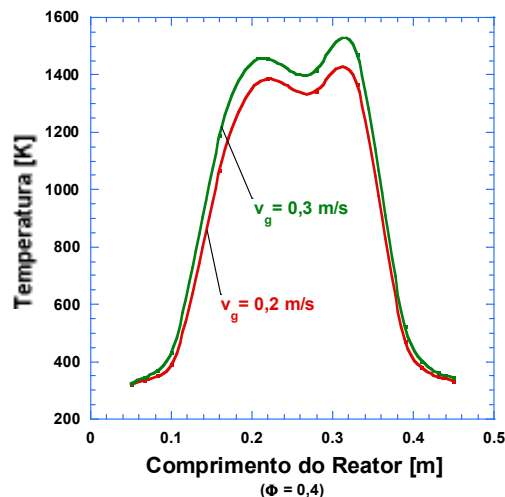


Fig. 5 – Influência da velocidade do escoamento dos gases sobre o perfil de temperatura

4.3 Temperatura de Exaustão

As Fig. 6 e 7 mostram influências da velocidade de escoamento dos gases e da razão de equivalência sobre a temperatura de exaustão. É possível perceber que a tendência em termos de perfil de temperatura é praticamente a mesma.

Observa-se que todas as temperaturas de exaustão são bastante baixas em comparação àquelas de exaustão de caldeiras convencionais, em qualquer condição de operação e independentemente da razão de equivalência ou da velocidade de escoamento dos gases empregados no experimento. Isso está provavelmente relacionado ao fato do calor de combustão, que seria perdido por radiação e convecção através dos gases na exaustão, ser absorvido pelo meio poroso e transferido aos trocadores de calor. Essa temperatura de exaustão reduzida sinaliza para uma alta eficiência térmica.

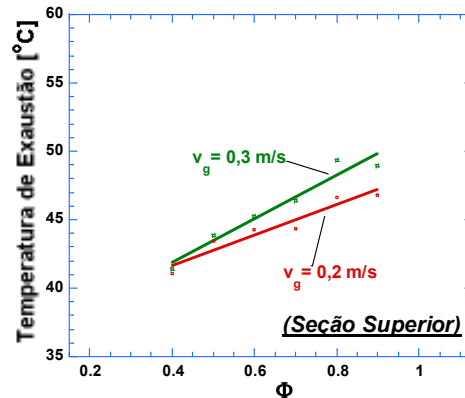


Fig. 6 – Visão geral do perfil de temperatura dos gases de exaustão na seção superior do boiler

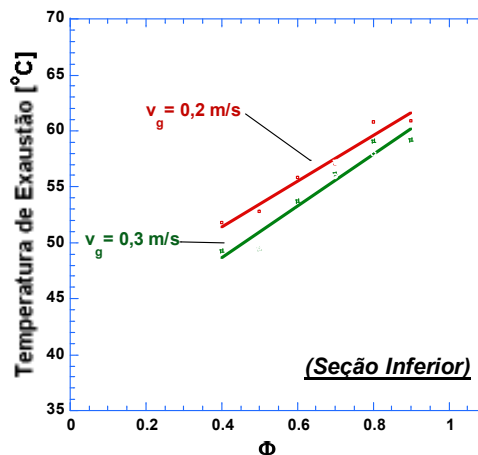


Fig. 7 – Visão geral do perfil de temperatura dos gases de exaustão na seção inferior do boiler

4.4 Emissões de NO_x e CO

Na avaliação das emissões do protótipo, os óxidos de nitrogênio (NO_x) e o monóxido de carbono (CO) foram escolhidos para serem estudados, em relação aos outros gases de combustão, porque a maioria dos gases restantes apresentam concentrações praticamente desprezíveis. Os resultados de emissões de NO_x e CO foram selecionados de uma grande faixa de experimentação, que leva em conta faixas extensas de razão de equivalência e de velocidade de escoamento dos gases.

A Fig. 8 mostra os efeitos da razão de equivalência na produção de CO para diferentes velocidades de escoamento dos gases. É verificado que as emissões de CO são menores que 0,5 ppm para misturas ultra-pobres, em ambas as velocidades de escoamento dos gases. Baseado nessa figura, é possível concluir que aumentos da velocidade de escoamento dos gases resulta em maior produção de CO.

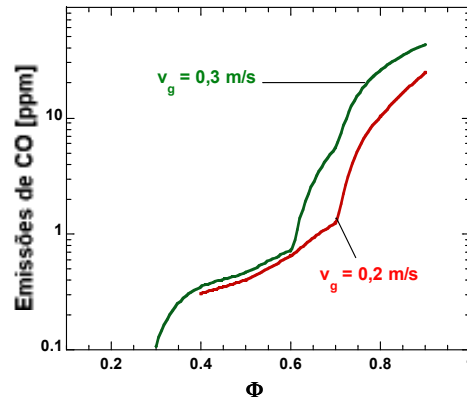


Fig. 8 – Visão geral dos perfis de emissões de CO

Semelhantemente, a Fig. 9 apresenta os efeitos da razão de equivalência sobre a produção de NO_x para ambas velocidades de escoamento dos gases. As emissões de NO_x crescem com aumentos da razão de equivalência. Se Φ é menor que 0,6, então, a emissão de NO_x é menor que 2 ppm, para as velocidades de escoamento dos gases experimentadas.

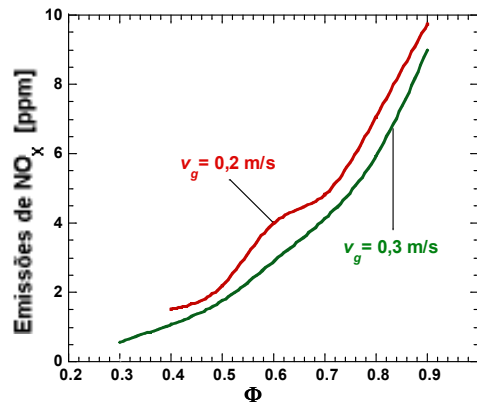


Fig. 9 – Visão geral dos perfis de emissões de NO_x

4.5. Medição da Eficiência

As eficiências térmicas medidas experimentalmente, que corresponde à eficiência de extração, estão na faixa de 70 a 93 %, dependendo da razão de equivalência e da velocidade de escoamento dos gases empregados, como mostra a Fig. 10. Os resultados experimentais apontam para um crescimento dos valores de eficiência com o aumento da razão de equivalência e da velocidade de escoamento dos gases.

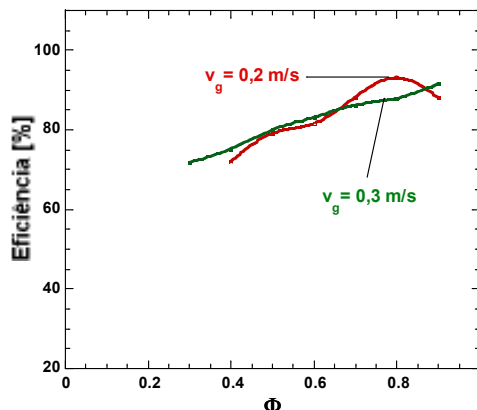


Fig. 10 – Visão geral dos perfis de eficiência térmica

A velocidade de escoamento dos gases e a razão de equivalência mostraram-se adequadas à extração energia do processo de combustão, sendo suficiente para arrefecer plenamente os trocadores de calor do protótipo em estudo.

Pelo que se observa na Fig. 10, a faixa de operação recomendada para esse protótipo está entre 0,3 a 0,8 que foi a faixa para a qual esse protótipo foi projetado, e que denota uma boa flexibilidade de operação desse protótipo. A expectativa no desenvolvimento desse equipamento em escala de aplicação comercial é a de conseguir melhores resultados de eficiência do que esses obtidos com o protótipo, por conta dos efeitos das perdas de calor pelas paredes, que são especialmente significativos quando em pequenos protótipos, devido a sua relativamente alta razão área-volume.

4.6 Produção de Vapor

A Fig. 11 mostra que em uma condição de operação extensa, combinando faixas de velocidade de escoamento dos gases e faixas de razão de equivalência, a caldeira apresenta uma quase linear produção de vapor para a maioria das condições impostas na experimentação do protótipo. Também, este gráfico informa que há um crescimento na produção de vapor com o aumento da velocidade de escoamento dos gases.

É possível observar que os ganhos, em termos de produção de vapor, com o aumento da velocidade de escoamento dos gases ficam reduzidos a partir de uma determinada razão de equivalência.

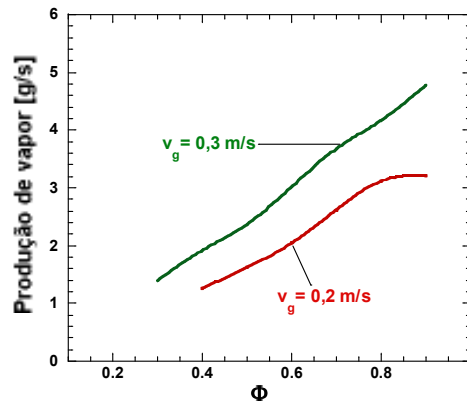


Fig. 11 – Visão geral dos perfis de produção de vapor

Baseado nessa figura verifica-se quão estável pode ser a geração de vapor nesse protótipo desenvolvido, após atingir uma condição de regime. A variação da temperatura do vapor na tubulação de saída é de ± 3 K, o que é uma importante característica desse novo tipo de caldeira de vapor. Deve-se ressaltar que o protótipo não dispõe de tubulão de armazenamento de vapor, como nas caldeiras convencionais. Essa variação de temperatura foi medida diretamente nas saídas das redes de vapor de cada uma das extremidades da caldeira.

5. CONCLUSÃO

Um novo conceito de caldeira de vapor com alta eficiência e baixa emissão foi desenvolvido, empregando-se a combustão em meios porosos recíproca em seu queimador. As principais conclusões estão resumidas a seguir:

- (1) O emprego da combustão em meios porosos recíproca proporciona não só uma extração de energia eficiente e baixas emissões, mas também, um alto grau de estabilidade do queimador;
- (2) Uma combustão estável na caldeira foi conseguida funcionando em uma ampla faixa de operação: $0,20 < \Phi < 1$ e $v_{gf} = 0,2$ e $0,3$ m/s;
- (3) A razão de equivalência e a velocidade de escoamento dos gases exibem uma forte influência sobre os perfis de temperatura, de eficiência e de emissões;
- (4) A presença de trocadores de calor confina as zonas de reação na seção central dos queimadores, permitindo combustão estável para uma faixa de razão de equivalência extensa;
- (5) Os trocadores de calor funcionam em alto regime de temperatura e a extração de energia do segundo trocador de calor não é suficiente para apagar o queimador;
- (6) O perfil de temperatura tem um formato trapezoidal típico, com um mínimo na região central do reator. Os trocadores de calor não permitiram uma expansão da distribuição de temperatura em sentido às zonas laterais;

- (7) A fração molar de NO_x nos produtos, de um modo geral, crescem de menos de 1 ppm em $\Phi = 0,2$ a 10 ppm em $\Phi = 0,8$, e a fração molar de CO nos produtos varia de menos de 0,5 ppm a 10 ppm para a faixa de razão de equivalência entre 0,2 e 0,7, para quase todas velocidades de escoamento dos gases.
- (8) A eficiência aumenta de 70% a 93%, conforme a razão de equivalência aumenta, principalmente em baixas velocidades dos gases, considerando a faixa estudada experimentalmente.

6. AGRADECIMENTOS

Essa pesquisa teve o apoio de três Instituições de fomento à pesquisa dos Governos Federal e Estadual do Ceará: ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

7. NOMENCLATURA

Φ – Razão de Equivalência (razão entre a relação combustível - ar real e a relação combustível - ar estequiométrica)

v_g – Velocidade do escoamento dos gases (produtos ou reagentes)[m/s]

\bar{P}_{extr} – Potência média extraída da reação pelos trocadores de calor [kW]

ΔH_{Cald} – Diferença de entalpia dos gases entre a entrada e a saída da caldeira por unidade de tempo [kW]

ΔT – Variação de temperatura [K]

\dot{m} – Vazão mássica [kg/s]

x – Comprimento do reator na linha de centro do reator [m]

$q_{peredes}$ – Energia perdida pelas paredes por unidade de tempo [kW]

c_p – Calor específico a pressão constante [kJ/kg - K]

χ – Título de vapor produzido [%]

h_{fg} – Entalpia de vaporização da água [kJ/kg]

PMI – Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]

\bar{P}_{quim} – Potência produzida pela queima do combustível [kW]

η_{term} – Eficiência térmica da caldeira [%]

8. REFERÊNCIAS

- BABKIN, V.S.; Filtration combustion of gases, present state of affairs and prospects, **Pure and Applied Chemistry** **65**: pp.335-344 (1993).
- BARCELLOS, W.M., SAVELIEV, A.V., AND KENNEDY, L.A. Low Emission Saturated Steam Boiler with Reciprocal Flow Inert Porous Media Combustor Operating on Ultra-lean Natural Gas/Air Mixtures. **Clean Air 2003** - Seventh International Conference on Energy for a Clean Environment, Lisbon, 2003.
- BARRA, A.J., DIEPVENS, G., ELLZEY, J.L., AND HENNEKE, M.R., “Numerical Study of the effects of material properties on flame stabilization in a porous burner”, **Combustion and Flame**, **134**: pp. 369-379 (2003).
- BINGUE, J.P.; SAVELIEV, A.V.; FRIDMAN, A.A.; AND KENNEDY, L.A.; NO_x and CO emissions of lean and ultra-lean filtration combustion of methane/air mixtures in inert porous media, in: **Proceedings of the Fifth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment**, Lisbon, Portugal, pp. 1361-1367 (1998).
- CONTARIN F.; BARCELLOS, W. M.; SAVELIEV, A. V.; AND KENNEDY, L. A.; A porous media reciprocal flow burner with embedded heat exchangers, Proc. **ASME Summer Heat Transfer Conference** – Paper No. HT2003-47098 (2003a).
- CONTARIN, F.; SAVELIEV, A.V.; FRIDMAN, A.A.; AND KENNEDY, L.A.; A reciprocal flow filtration combustor with embedded heat exchangers: numerical study, **International Journal of Heat and Mass Transfer** **36**: pp. 949-961 (2003b).

- DRAYTON M.K.; SAVELIEV, A.V.; KENNEDY, L.A.; AND FRIDMAN, A.A.; Syngas production using superadiabatic combustion of ultra-rich methane-air mixtures, **Proceedings of Combustion Institute 27**: pp. 1361-1367 (1998).
- EGERTON, A., GUGAN, K. AND WEINBERG, F.J.; The mechanism of smouldering in cigarettes, **Imperial College of Science and Technology**, London S.W.7, pp. 63-78 (1963).
- HACKERT, C.L., ELLZEY, J.L., and EZEKOYE, O.A., "Combustion and heat transfer in model two-dimensional porous burners", **Combust. Flame**, **116**:1-2, pp. 177-191 (1999).
- HANNAMURA, K.; ECHIGO, R.; AND ZHDANOK, S.; Superadiabatic combustion in porous media, **International Journal of Heat and Mass Transfer 36**: pp. 3201-3209 (1993).
- HOFFMANN, J.G.; ECHIGO, R.; YOSHIDA, H.; AND TADA, S.; Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system, **Combustion and Flame 111**: pp. 32-46 (1997).
- HSU, P.F., and MATTHEWS, R.D., "The necessity of using detailed kinetics in models for premixed combustion within inert porous media", **Combust. Flame**, **93**: pp.457-466 (1993).
- KAVIANY, M., "Principles of Heat Transfer in a porous Media", **Springer-Verlag**, New York (1995).
- KENNEDY, L.A.; FRIDMAN, A.A.; AND SAVELIEV, A.V.; Superadiabatic combustion in porous media: wave propagation, instabilities, new type of chemical reactor, **Fluid Mechanics Research 22**: pp. 1-26 (1995a).
- KENNEDY, L.A.; SAVELIEV, A.V.; AND FRIDMAN, A.A.; Transient filtration combustion, in: **Proceedings of Mediterranean Combustion Symposium**, Antalya, Turkey, pp. 105-128 (1995b).
- LITTLEJOHN, D.; MAJESKI, A. J.; TONSE, S.; AND CASTALDINI, C.; Laboratory investigation of an ultra-low NO_x premixed combustion concept for industrial boilers, **Proceedings of Combustion Institute 29**: pp. 1115-1121 (2002).
- RUMMINGER, M.D.; DIBBIE, R.W., HEBERLE, N.H., AND CROSLLEY, D.R.; Gas temperature above a radiant porous burner: comparison of measurements and model predictions, **Proceedings of Combustion Institute 26**: pp.1755-1762 (1996).
- TAKENO, T., SATO, K., AND HASE, K., "A theoretical study on an excess enthalpy flame", **Eighteenth Symposium (International) on Combustion**, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1: pp. 465-471 (1980).
- TONG, T.W.; AND SATHE, S.B.; Heat transfer characteristics of porous radiant burners, **Journal of Heat Transfer 113**: pp. 387-407 (1991).
- WEINBERG, F.J., BARTLEET, T.G., CARLETON, F. B., RIMBOTTI, P., BROPHY, J.H., AND MANNING, R. P., "Partial oxidation of fuel-rich mixtures in a spouted bed combustor", **Combustion and Flame**, **72**: pp. 235-239 (1988).
- XIONG, T.Y.; KHINKIS, M.J.; AND FISH, F.F.; Experimental study of a high-efficiency, low emission porous matrix combustor-heater, **Fuel 74**: pp. 1641-1647 (1995).