UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

> FILIPE ARTHUR FIRMINO MONHOL JADERSON NUNES PRETTI

CONCEPÇÃO E CALIBRAÇÃO DE UMA CÉLULA DE COMBUSTÃO MINUCIOSAMENTE INSTRUMENTADA PARA A ANÁLISE DA CONVERSÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA

> VITÓRIA 2013

FILIPE ARTHUR FIRMINO MONHOL JADERSON NUNES PRETTI

CONCEPÇÃO E CALIBRAÇÃO DE UMA CÉLULA DE COMBUSTÃO MINUCIOSAMENTE INSTRUMENTADA PARA A ANÁLISE DA CONVERSÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA

Projeto de Conclusão de Curso Departamento apresentado de ao Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador:Prof. Márcio Ferreira Martins,Ph.D.

VITÓRIA 2013

FILIPE ARTHUR FIRMINO MONHOL JADERSON NUNES PRETTI

CONCEPÇÃO E CALIBRAÇÃO DE UMA CÉLULA DE COMBUSTÃO MINUCIOSAMENTE INSTRUMENTADA PARA A ANÁLISE DA CONVERSÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA

Projeto de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em _____ de _____ de 2013.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Márcio Ferreira Martins,Ph.D. Universidade Federal do Espírito Santo Orientador

Prof. Juan Sérgio Romero Saenz, D.Sc. Universidade Federal do Espírito Santo Examinador

Mestrando João Vitor Ferreira Duque Universidade Federal do Espírito Santo Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos a Deus por esta realização e conquista em nossas vidas.

Agradecemos as nossas famílias e a quem amamos por toda confiança depositada em nós, agradecemos ao nosso orientador Márcio Martins por ter sido mais que um professor, um grande amigo que acreditou no desafio e nos ajudou a concretizar. Agradecemos aos outros docentes que nos ajudaram fornecendo todo o conhecimento que nos foi passado fortalecendo nossa habilidade de raciocinar sobre um problema e com isso desenvolver soluções. Agradecemos aos amigos da equipe VitóriaBaja, Laboratório de Soldagem e Laboratório de Máquinas de Fluxo da UFES pelo espaço, ferramentas, tempo e a ajuda a nós dados. Agradecemos aos amigos, aos presentes, aos ausentes, aos distantes e todos os outros que acreditaram em nosso potencial e sempre estiveram ao nosso lado, torcendo pelo melhor de cada um de nós.

Para concluir prestamos nossos agradecimentos à Agência Nacional de Petróleo e Gás – ANP, e seu programa de recursos humanos, PRH-29, pelo auxílio financeiro ajudando assim no desenvolvimento de nosso trabalho.

RESUMO

Com o constante aumento da demanda energética industrial e populacional é necessário o estudo de fontes alternativas de energia bem como técnicas para sua conversão em trabalho útil, em diferentes escalas de consumo. A partir do final do século passado, os impactos ambientais têm recebido grande destaque, servindo de impulsionador para o desenvolvimento de combustíveis mais limpos. Outro fator importante é que a humanidade esta produzindo cada vez mais resíduo sólido, e neste, existe um potencial energético que não pode ser negligenciado. Neste contexto, a combustão se mostra uma boa alternativa para o reaproveitamento energético desses resíduos, no entanto, é indispensável um entendimento detalhado do processo, bem como das variáveis de operação.

Portanto, este trabalho tem como objetivo a concepção e a calibração de uma célula de combustão versátil, minuciosamente instrumentada, capaz de fornecer dados precisos para estudos "benchmark" do processo de combustão de diferentes resíduos sólidos sob diferentes configurações de reator (co-corrente ou contracorrente).

A célula é constituída de um tubo de aço inox com revestimento isolante de material cerâmico. Um conjunto de oito termopares, igualmente espaçados, ao longo do eixo axial é usado para registrar as temperaturas da frente de combustão. Uma coroa de seis termopares localizada à meia altura da célula e posicionada perto da parede é usada para verificação da geometria da frente. Ainda nessa meia altura, foi projetado um sistema de micro-amostragem para coletar pequenas amostras de gás sobre a frente de combustão no momento de sua passagem para determinação da estrutura química da frente. Para ignição do processo foi projetado e calibrado um dispositivo cônico que fornecerá energia radiante através de uma janela de quartzo, localizada no topo da célula. O fluxo de calor do cone para o combustível é determinado por meio de uma superfície de temperatura obtida durante a calibração do mesmo. Um sistema de alimentação de ar ininterrupto foi projetado para permitir a mudança do tipo de reator – se co-corrente ou contracorrente. Todos os instrumentos de medição são ligados a um sistema de aquisição de dados automatizado, permitindo um registro contínuo de todos os experimentos. Para transformação dos sinais elétricos - dos termopares e analisadores de pressão - em quantidades fisicamente

mensuráveis, e ao mesmo tempo, visualizá-los em uma interface gráfica de monitoramento foi utilizado a linguagem LabVIEW.

Palavras chave: fontes alternativas de energia, célula de combustão e resíduos sólidos

ABSTRACT

With the rising demand for energy and industrial population is necessary to study alternative energy sources as well as techniques for their conversion into useful work at different scales of consumption. From the end of last century, the environmental impacts have received great attention, serving as a driver for the development of cleaner fuels. Another important factor is that mankind is producing increasingly solid residue, and in this, there is the potential energy that can not be overlooked. In this context, the combustion proves a good alternative for the recycling of this waste energy, however, is essential to a detailed understanding of the process and operating variables.

Therefore, this paper aims to design and calibration of a cell combustion versatile, thoroughly instrumented, able to provide accurate data for studies " benchmark " the process of combustion of different solid waste under different reactor configurations (co - current or countercurrent .)

The cell consists of a stainless steel pipe with an insulating coating of ceramic material. A set of nine thermocouples evenly spaced along the axial axis is used to record the temperature of the combustion front . A crown six thermocouples located in the half cell height and positioned near the wall is used to check the geometry of the front. Yet this half-height, designed a system of micro -sampling to collect small samples of gas on the combustion front at the time of its passage to determine the chemical structure of the front . For ignition process was designed and calibrated to provide a device conical radiant energy through a quartz window located at the top of the cell. The heat flow to the fuel cone is determined by a surface temperature obtained during calibration thereof. A system of continuous air supply was designed to allow changing the type of reactor - is co - current or countercurrent . All measuring instruments are connected to a data acquisition system automated, allowing a continuous record of all experiments . For transformation of electrical signals - the thermocouples and pressure analyzers - in physically measurable quantities , and at the same time, view them in a graphical interface monitoring was used language LabVIEW.

Keywords: alternative energy sources, combustion cell and solid waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo True in-situ (fonte: M.F. Martins)	14
Figura 2 – Sinterização do clínquer	15
Figura 3 – Esquema do processo de gaseificação de biomassa	16
Figura 4 – Gaseificador GEK PowerPallet 20KW do Laboratório de	
Combustíveis e Combustão	17
Figura 5 – Zonas de reação (adaptado M.F.Martins)	18
Figura 6 – Zonas de Reações em uma frente de propagação da combustão	
(adaptado M.F.Martins)	19
Figura 7 – Arranjos: (a) contra-corrente, (b) co-corrente (adaptado M.F.Martins)	20
Figura 8 – Interação entre as fases (adaptado [3])	22
Figura 9 – Efeito da taxa de fornecimento de ar na combustão em leito fixo	
(adaptado Shin e Choi)	23
Figura 10 – Cone de ignição	25
Figura 11 – Esquema com cotas do aparato além das superfícies de troca	
enumeradas (1-Reator, 2-Aquecedor e 3-Ambiente), medidas em	
mm (adaptado B.R. Pacheco)	26
Figura 12 - Fator de forma associado a troca de calor por radiação entre os	
elementos infinitesimais de área dAi e dAj (adaptado B.R. Pacheco).	27
Figura 13 – Esquema do fator de forma usado para simular a radiação do cone	
de aquecimento (adaptado B.R. Pacheco)	28
Figura 14 – Representação da rede de troca radiante entre a superfície i e as	
superfícies restantes (adaptado B.R. Pacheco)	30
Figura 15 – Termopares no plano basal	31
Figura 16 – Perfis de temperatura (calibração do cone calorímetro)	32
Figura 17 – Superfícies de Temperatura: a) Z=0mm; b) Z=25mm e c) Z=50mm	33
Figura 18 – Montagem dos material isolante (manta térmica)	34
Figura 19 – Croqui da célula de combustão em meio poroso, com sistema de	
micro-amostragem (adaptado M.F. Martins)	35
Figura 20 – Seção transversal (A) Altura das entradas de ar (B) Altura da coroa	
de termopares (adaptado M.F.Martins)	36
Figura 21 – Analisador de gás testo M/XL	37

Figura 22 – Configurações para coleta de produtos gasosos da combustão	38
Figura 23 – Bancada de testes	39
Figura 24 – Sensores de temperatura	41
Figura 25 – Evolução de temperatura ao longo do tempo	44
Figura 26 – Perfil axial de temperatura ao longo do reator para diferentes	
tempos do Experimento 5	45
Figura 27 – Estrutura geométrica da frente de combustão	46
Figura 28 – Evolução de pressão no reator ao longo dos experimentos	47
Figura 29 – Formato da frente de combustão - (a) Vista frontal e (b) Vista	
superior	48
Figura 30 – (A) Curvas posição x tempo (B) Velocidade da frente em mm/min	50
Figura 31 – Análises de gás na saída do reator	52
Figura 32 – Análises de gás na coroa	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características principais dos experimentos40
--

INTR	ODUÇÃO	11
1	ESTADO DA ARTE	13
2	EQUIPAMENTOS	24
2.1	EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS	24
2.1.1	CONE DE IGNIÇÃO	24
2.1.2	CÉLULA DE COMBUSTÃO	33
2.1.3	ANALISADOR DE GÁS	36
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	39
3.1	SENSORES DE TEMPERATURA	40
3.2	TESTE HIDROSTÁTICO	41
3.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	41
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	43
4.1	ASPECTOS FÍSICOS	43
4.1.1	TEMPERATURA DO LEITO	43
4.1.2	EVOLUÇÃO DE PRESSÃO NO TOPO DO LEITO	47
4.2	FRENTE DE COMBUSTÃO	47
4.2.1	FORMATO DA FRENTE DE COMBUSTÃO	47
4.2.2	VELOCIDADE DA FRENTE DE COMBUSTÃO	49
4.3	ANÁLISE DE GÁS	50
CON	CLUSÕES	53
PROF	POSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS	55
REFE	ERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO

A energia tem sido através da história a base do desenvolvimento das civilizações. Nos dias atuais são cada vez maiores as necessidades energéticas para a produção de alimentos, bens de consumo, bens de serviço e de produção, lazer, e finalmente para promover o desenvolvimento econômico, social e cultural. É assim, evidente a importância da energia não só no contexto das grandes nações industrializadas, mas principalmente naquelas em via de desenvolvimento, cujas necessidades energéticas são ainda mais dramáticas e urgentes. Dentro desse contexto, as fontes alternativas de energia vêm ganhando cada vez mais adeptos, e força no seu desenvolvimento e aplicação para minimizar a dependência mundial pelos combustíveis fósseis, tendo em vista que estes estão se tornando escassos. Além disso, a ênfase à preservação e conservação do meio ambiente como forma de garantir um desenvolvimento sustentável, é constantemente abordada e discutida em eventos que envolvem diversas nações e organizações por todo o planeta. Assim, é necessário o desenvolvimento de combustíveis alternativos limpos que substituam os existentes sem comprometer a demanda energética do planeta. Como, por exemplo, a biomassa, que tem se mostrado uma excelente alternativa que alia a alta capacidade de produção energética aos baixos índices de emissão de poluentes. A produção sustentável de biomassa e seu uso para geração de energia através da combustão não leva a um aumento dos níveis de CO2 na atmosfera, pois o CO2 liberado durante a combustão é seqüestrado durante novos crescimentos. Além disso, a utilização da biomassa pode levar a redução líquida de emissões de CO2 se substituir os combustíveis fósseis.

Deve-se ressaltar, ainda, que um dos grandes vilões à preservação ambiental são os resíduos sólidos produzidos pelo homem, como o lixo e até mesmo os resíduos de esgoto. Esses resíduos, em geral, são descartados de maneira indevida e levam muito tempo para se degradarem no meio ambiente, além dos danos causados na região que foram descartados e se, quando queimados de maneira indiscriminada, produzem substâncias tóxicas à saúde humana, fauna e flora. No entanto, não se pode desconsiderar o grande potencial energético contido nesses resíduos de descarte, uma vez que são, na sua maioria, constituídos de elementos orgânicos, semelhantes à biomassa, e produtos de alta capacidade energética podendo, assim,

serem reaproveitados de maneira consciente para a geração de energia barata e de fácil obtenção.

O desenvolvimento de pesquisas na área energética demonstra que há inúmeras possibilidades de reaproveitamento dos materiais ao nosso redor para produção de fontes alternativas de energia. Mesclar o conceito de reaproveitamento energético, com a diminuição de resíduos, somados ao desejo de minimizar efeitos nocivos à natureza e ao homem, e principalmente, fazendo-o de uma maneira economicamente viável, são variáveis complexas de se linearizar a fim de se obter o melhor aproveitamento e eficiência das mesmas. Por isso, a concepção de um processo alternativo de reaproveitamento de diversos resíduos produzidos pela humanidade é um desafio que vem sendo pesquisado arduamente por diversas instituições em vários países, com um desejo de resolver problemas ambientais e obter um processo eficiente e lucrativo, que pode vir a tornar-se uma possível solução para o problema gerado pelo consumo acelerado de produtos pela sociedade.

A conversão dos resíduos sólidos, como fonte alternativa de energia tem se tornado possível através de tecnologias aplicadas em combustão. Apesar de ser encarada como uma forma suja de produção de energia, a combustão pode ser utilizada de maneira consciente e limpa sem acarretar danos para a natureza. Para isso, um estudo detalhado da combustão se faz necessário.

A propagação de uma frente de combustão ocorre numa variedade de situações e para diferentes propósitos, tais como incineração de resíduos, gaseificação, combustão in-situ, sinterização, processos metalúrgicos e outros processos de queima de combustíveis sólidos.

Assim, o objetivo deste trabalho é conceber uma célula de combustão, na qual se possa ensaiar diferentes tipos de combustíveis sólidos. Esta célula foi especialmente desenvolvida para o presente projeto no Laboratório de Combustíveis e Combustão da Universidade Federal do Espírito Santo.

1 ESTADO DA ARTE

A combustão é uma das mais antigas tecnologias da humanidade e vem sendo usada por mais de um milhão de anos para diferentes propósitos. Objetivando evitar uma iminente crise energética devido a crescente demanda e esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, o desempenho dos sistemas de combustão existentes precisa melhorar ainda mais, e ao mesmo tempo, reduzir os níveis de emissões para atender às normas de emissões internacionais.

1.1 TECNOLOGIAS APLICADAS NA COMBUSTÃO EM MEIOS POROSOS

1.1.1 COMBUSTÃO IN-SITU

Processos In-Situ podem ser tecnicamente viáveis em formações mais ricas e profundas onde a rocha possui uma permeabilidade natural ou pode se tornar permeável por fratura. Entre os mais promissores processos In-Situ destacam-se: *True in-situ processes, Modified in-situ (MIS) e Modified True in-situ process.*

Processos True in-situ não envolvem a indústria de mineração, Figura 1. A rocha é fraturada, o ar é injetado, em seguida, o xisto betuminoso é inflamado para aquecer a formação, e óleo de xisto se move através das fraturas em direção aos poços de produção. Dificuldades em controlar a frente de combustão e o fluxo de óleo podem limitar a recuperação de óleo, deixando áreas sem aquecimento e óleos sem recuperação.



Figura 1 – Processo True in-situ (fonte: M.F. Martins)

- O processo MIS pode involver a mineração. Uma caverna subterrânea é escavada e uma carga explosiva é detonada para preencher a caverna com escombros de xisto. A rocha é aquecida pela ignição da parte superior da formação e os fluidos são recuperados à frente ou abaixo da zona aquecida.
- Os processos Modified True in-situ melhoram desempenhos por aquecerem mais o óleo de xisto, melhorando o fluxo de gases e líquidos no interior da formação rochosa, e aumentando o volume a qualidade do óleo produzido.

1.1.2 SINTERIZAÇÃO NA INDÚSTRIA DO CIMENTO

O cimento é um material fabricado na forma de um pó fino, com dimensões médias da ordem dos 50 µm, que resulta da mistura de clínquer com outros materiais, tais como o gesso e escórias siliciosas, em quantidades que dependem do tipo de aplicação e das características procuradas para o cimento. O clínquer, o principal constituinte do cimento, é produzido por transformação térmica a elevada temperatura em fornos apropriados, de uma mistura de material rochoso contendo aproximadamente 80% de carbonato de cálcio (CaCO3), 15% de dióxido de silício (SiO2), 3% de óxido de alumínio (Al2O3) e quantidades menores de outros

constituintes, como o ferro, o enxofre, etc. Estes materiais são normalmente escavados em pedreiras de calcário, ou margas, localizadas nas proximidades dos fornos de produção do clínquer. A matéria prima é misturada e moída finamente, e submetida a um processo de aquecimento que leva à produção final do clínquer.

A energia necessária à secagem, calcinação e sinterização do clínquer, ou clinquerização, é obtida pela queima de uma variedade de combustíveis, como o o carvão mineral e o coque de petróleo. Outros combustíveis também usados é o gás natural e combustíveis alternativos como pneus usados, papel velho, resíduos de madeira, etc. A Figura 2 ilustra o processo de sinterização.



Figura 2 - Sinterização do clínquer

Na sinterização, a preparação do minério de ferro é feita cuidando-se da granulometria, visto que os grãos mais finos são indesejáveis, pois diminuem a permeabilidade do ar na combustão, comprometendo a queima. Para solucionar o problema, adicionam-se materiais fundentes (calcário, areia de sílica ou o próprio sínter) aos grão mais finos.

Com a composição correta, estes elementos são levados ao forno onde a mistura é fundida. Em seguida, o material resultante é resfriado e britado até atingir a granulometria desejada (diâmetro médio de 5mm). O produto final deste processo é denominado de sínter.

1.1.3 GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

A gaseificação é um dos vários processos de conversão da biomassa em biocombustíveis. Este consiste em transformar a matéria orgânica através da combustão em uma condição de escassez de ar em relação à queima estequiométrica, ou seja, o ar fornecido ao processo deverá ser menor do que aquele que garantiria a queima completa do combustível.

Nos processos de gaseificação a matéria orgânica é total ou parcialmente transformada em gases cujos principais componentes são: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO2), hidrogênio (H2) e, dependendo das condições, metano (CH4), hidrocarbonetos leves (pequenas cadeias de CnHm), pequenas quantidades de produto sólido como as cinzas, compostos condensáveis (alcatrão e óleos), nitrogênio (N2) e vapor de água em diferentes proporções CENBIO (2002). Dentre as características do gás de síntese, destacam-se o alto teor de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H2), que conferem ao gas de síntese um valor energético classificado entre baixo a médio (Kirkels e Verbong, 2011).



Figura 3 – Esquema do processo de gaseificação de biomassa

Estudos da combustão de diferentes combustíveis para gaseificadores estarão sendo realizados no Laboratório de Combustíveis e Combustão da UFES com objetivo de produzir biocombustíveis de alta qualidade utilizando o Gaseificador GEK PowerPallet 20KW mostrado na figura 4.



Figura 4 – Gaseificador GEK PowerPallet 20KW do Laboratório de Combustíveis e Combustão

1.2 PROPAGAÇÃO DA FRENTE DE COMBUSTÃO

Como visto anteriormente, a propagação de uma frente de combustão ocorre numa variedade de situações e para diferentes propósitos, tais como a incineração de resíduos, combustão in-situ ou queima de combustíveis sólidos em aplicações industriais. A descrição da propagação da frente de combustão em um meio poroso reativo permanece como um desafio para a ciência em termos de físico-química e transferência de calor e massa.

Além dos processos convencionais de recuperação de combustíveis descritos acima, existem outros processos onde a frente de combustão é propagada em um meio poroso reativo, *smoldering combustion*. Este processo é descrito por uma superfície exotérmica reativa que pode se propagar no interior de combustíveis sólidos porosos, e é uma reação auto-sustentável em que o calor liberado pela oxidação da superfície causa pirólise do combustível adjacente não afetado pela zona de reação. Smoldering de jazidas de carvão e resíduos de carvão são reconhecidas por causar problemas ambientais e econômicos de extensão global. Além disso, este tipo de queima de carvão representa um dos mais desafiadores riscos para as indústrias de carvão de todo o mundo. Segundo Guillermo et al o calor liberado pela *smoldering combustion* é baixo quando comparado a uma combustão com excesso de oxigênio, e sua propagação é uma processo lento. As perdas de calor e disponibilidade de oxigênio são os parâmetros mais importantes a serem controlados nos ensaios de *smoldering combustion*.

De acordo com (Hobbs, Radulovic Smoot e 1993), o primeiro grande esforço no estudo da propagação da frente de combustão data de 1977 e 1979. Desde então, familiares problemas ambientais e a busca de fontes alternativas de energia tem motivado maiores pesquisas sobre o assunto. Estes esforços centraram-se na determinação dos parâmetros que influenciam o progresso e a estrutura de uma frente de combustão. Com esta finalidade, alguns autores tem desenvolvido modelos numéricos e dispositivos ambientais.

Em todas as aplicações mencionadas acima é possível distinguir três zonas globais, figura 5.



Figura 5 – Zonas de reação (adaptado M.F.Martins)

Cada zona é caracterizada por uma importante etapa no processo de conversão do combustível. Os processos nas três zonas estão comentados abaixo:

- a) Zona de secagem: combustível sólido é introduzido no reator. Como resultado da transferência de calor a partir de partes do reator, a secagem do combustível sólido ocorre.
- b) Zona de pirólise: em temperaturas superiores a 250 °C, começa a pirólise do combustível sólido. As moléculas grandes decompoem-se em moléculas de tamanho médio e carbono fixo.
- c) Zona de oxidação: uma zona de queima (oxidação) é formada no nível onde o oxigênio (ar) é introduzido. Reações com oxigênio são altamente exotérmicas e resultam em um aumento acentuado de temperatura (1200 – 1500 °C).

Essa é uma abordagem simplificada, tendo em vista que uma série de outras reações além da oxidação, em ordem nem sempre definida, ocorre em uma frente de combustão a depender do combustível e de vários outros fatores. Assim, é mais apropriado definir uma zona de reação ao invés de uma zona de oxidação. A Figura 6 mostra as regiões presentes em um leito de combustível (baseado em carbono com alguma umidade) ao se propagar uma frente de combustão. Pode-se observar claramente a região onde as reações são mais intensas, bem como a variação da temperatura e dos níveis de O2, CO2 e Carbono.



Figura 6 – Zonas de Reações em uma frente de propagação da combustão (adaptado M.F.Martins)

1.2.1 CONFIGURAÇÕES CONTRA-CORRENTE E CO-CORRENTE

A propagação de uma frente de combustão pode ocorrer em duas situações elementares diferentes:

- Combustão contra-corrente, onde a frente de ignição e alimentação de ar ocorrem em lados opostos do leito de combustível, Figura 7-a. O fornecimento de ar em contra-corrente é normalmente encontrado em processos de combustão em leito fixo.
- Combustão co-corrente, onde a frente de ignição e a alimentação de ar ocorrem do mesmo lado no leito de combistível, Figura 7-b. O melhor exemplo de combustão co-corrente pode ser encontrado em combustão insitu na recuperação de petróleo.



Figura 7 – Arranjos: (a) contra-corrente, (b) co-corrente (adaptado M.F.Martins)

1.2.2 FENÔMENOS DE TRANSPORTE EM UM MEIO POROSO

(Hobbs, Radulovic and Smoot 1993) fizeram uma breve descrição qualitativa dos processos físicos e químicos que ocorrem durante a combustão em leito fixo.

A descrição da interação de transferência de calor e massa entre as fases gasosa e sólida, e entre as partículas são descritas na Figura 8, como se segue:

- 1. Condução através das partículas sólidas;
- 2. Condução entre as partículas sólidas em contato;
- 3. Radiação entre as partículas sólidas;
- 4. Convecção a partir das partículas sólidas para o fluido;
- 5. Radiação a partir de partículas sólidas para o fluido;
- 6. Condução através de fluidos;
- 7. Radiação através de fluidos;
- 8. Mistura de fluidos;
- 9. Condução a partir das partículas sólidas para as paredes do reator;
- 10. Radiação a partir das partículas sólidas para as paredes do reator;
- 11.Convecção a partir das partículas sólidas para as paredes do reator;
- 12. Radiação a partir de fluidos para as paredes do reator;



Figura 8 – Interação entre as fases (adaptado [3]).

1.3 ESTRUTURA TERMOQUÍMICA DA FRENTE DE COMBUSTÃO

Apenas alguns trabalhos experimentais em combustão co-corrente foram realizados fora até agora. Shin e Choi propuseram um conceito para a propagação em contracorrente de uma frente de combustão. A combustão de combustível sólido em um leito fixo foi investigada usando experimentos unidimensionais. Os efeitos da taxa de fornecimento de ar, o tamanho das partículas e poder calorífico do combustível são discutidos. Dois modos de combustão em leito fixo podem ser distinguidos, com base na disponibilidade de oxigênio.

 Combustão limitada pelo oxigênio: Em baixas taxas de fornecimento de ar o oxigênio é completamente consumido pelo carvão e pela reação do material volátil. Neste caso, a taxa de reação do combustível é determinada pela taxa de fornecimento de oxigênio.

- Combustão limitada pela reação: Se a taxa de fornecimento de ar aumenta, a combustão é aumentada, mas devido à existência do limite da taxa de

combustão do material no interior do leito, ocorre um aumento da concentração de oxigênio na saída. Neste caso, a taxa de reação não pode aumentar ainda mais devido à taxa limite de reação, e portanto, pode-se observar o arrefecimento do leito pela convecção do ar.

Shin e Choi propuseram uma representação esquemática, a figura 9, para mostrar como a combustão depende da taxa de fornecimento de ar.



Figura 9 – Efeito da taxa de fornecimento de ar na combustão em leito fixo (adaptado Shin e Choi)

A chama pode ser mantida enquanto a taxa de liberação de calor no leito exceder a convecção arrefecimento do fornecimento de ar. Quando a taxa de fornecimento de ar aumenta ainda mais, a zona de combustão em fase gasosa é varrida e a zona de combustão do carvão experimenta arrefecimento devido a alta convecção, resultando na extinção da chama.

2 EQUIPAMENTOS

Neste projeto de graduação foi utilizado um instrumento principal: uma célula de combustão instrumentada. Esta célula foi especialmente desenvolvida para o presente projeto no Laboratório de Combustíveis e Combustão da Universidade Federal do Espírito Santo.

Para construção do objeto de pesquisa, foi necessária a utilização de ferramentas para as mais variadas finalidades, para corte, furação, torneamento, soldagem, medição elétrica e ferramentas em geral, dispostas nos laboratórios do prédio ITUFES – CT V pertencente ao Centro Tecnológico da UFES, são estes, o Laboratório de Tecnologia Mecânica, onde se encontra a Equipe VitóriaBaja da universidade, que cedeu espaço, ferramental próprio e ajuda de seus membros e o Laboratório de Combustíveis e Combustão que cedeu o espaço para sediar e organizar todos os materiais, ferramentas, equipamentos e os protótipos, inerentes para realização desta pesquisa.

2.1 EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS

2.1.1 CONE DE IGNIÇÃO

Para iniciar a combustão por intermédio de um perfil uniforme radiante, um dispositivo de ignição é utilizado, chamado cone de ignição, Figura 10. No momento da ignição a temperatura do cone é ajustada entre os valores de 500 e 570 °C (temperatura da resistência) para impor um fluxo de calor uniforme sobre o topo da superfície do resíduo sólido.



Figura 10 – Cone de ignição

O fluxo de radiação atravessa uma janela de quartzo que garante a vedação da célula de combustão. Devido às limitações mecânicas e térmicas sobre a parte superior da célula (flange de aço, juntas isolantes e manta térmica), foi necessário aumentar a distância entre o cone e a superfície de da amostra, de 25 a 70 mm, resultando em um fluxo de calor por radiação não uniforme na superfície do resíduo.

As medidas do reator são mostradas na Figura 11 assim como as superfícies de troca de calor. No aquecedor, há também uma manta isolante que é retirada a partir de um tempo suficiente para que o cone atinja o regime permanente.



Figura 11 – Esquema com cotas do aparato além das superfícies de troca enumeradas (1-Reator, 2-Aquecedor e 3-Ambiente), medidas em mm (adaptado B.R. Pacheco)

2.1.1.1 CÁLCULO DO FLUXO RADIANTE LÍQUIDO

Para a determinação do fluxo radiante líquido no processo de ignição foi utilizado o conceito de transferência de calor por radiação entre superfícies, levando-se em conta suas geometrias, o Fator de Forma.

O fator de forma Fij é definido como a fração da radiação que deixa a superfície i e é interceptada pela superfície j e é definido pela integral dupla referente às superfícies (Figura 12) envolvidas no processo, Equação 2.1.



Figura 12 - Fator de forma associado a troca de calor por radiação entre os elementos infinitesimais de área dAi e dAj (adaptado B.R. Pacheco)

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \qquad 2.1$$

E temos as seguintes relações entre fatores de forma:

$$F_{ij}A_{i} = F_{ji}A_{j}$$
 2.2
 $\sum_{j=1}^{n} F_{ij} = 1$ 2.3

Os fatores de forma de várias geometrias são encontrados em tabelas. Para a geometria do aquecedor cônico e do leito usou-se uma aproximação de um círculo e um anel circular conforme a Figura 13. Para essa geometria o fator de forma calculado é descrito pela Equação 2.4.



Figura 13 – Esquema do fator de forma usado para simular a radiação do cone de aquecimento (adaptado B.R. Pacheco)

$$F_{12} = \frac{1}{2} \left\{ R_3^2 - R_2^2 - \left[\left(1 + R_3^2 + H^2 \right)^2 - 4R_3^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[\left(1 + R^2 + H^2 \right)^2 - 4R_2^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$
 2.4

Em que: $H = a/r_1$; $R_2 = r_2/r_1$; $R_3 = r_3/r_1$

Porém o interesse é em saber o fator de forma da superfície 2 (aquecedor) para a superfície 1 (leito de xisto betuminoso). Utilizando a relação entre fatores de forma da Equação 2.2 obtemos o fator de forma da superfície 2 para a superfície 1.

$$F_{21} = \frac{A_1 F_{12}}{A_2}$$
 2.5

E com a Equação 2.3, sabendo que há três superfícies e que $F_{11} = F_{22} = 0$

$$F_{13} = 1 - F_{12}$$

$$F_{23} = 1 - F_{21}$$
2.6
2.7

A troca líquida de radiação em uma superfície é definida pela diferença entre a radiosidade (J) de uma superfície e sua irradiação (G), e pode ser escrita na forma:

$$q_i = A_i (J_i - G_i)$$
 2.8

e da definição de radiosidade, J_i

$$J_i = E_i + \rho_i G_i \tag{2.9}$$

Considerando agora uma superfície cinza, ou seja, que possui uma emissividade diferente da unidade, reescreve-se a radiosidade:

$$J_i = \varepsilon_i E_{cni} + (1 - \varepsilon_i)G_i$$
 2.10

$$\rho_i = 1 - \varepsilon_i \tag{2.11}$$

Pode-se então substituir as Equações 2.8 e 2.10 em função da radiosidade e obtemos

$$q_i = \frac{E_{cni} - J_i}{(1 - \varepsilon_i) / \varepsilon_i A_i}$$
 2.12

Percebe-se que para $\varepsilon_i = 1$ e $A_i \rightarrow \infty$, o termo no denominador, que é uma resistência radiante superficial, é anulado e comporta-se como um corpo negro $(\varepsilon_1 = 1)$. Conclui-se, portanto, que podemos considerar um corpo muito grande como um corpo negro. Essa consideração foi utilizada na definição da emissividade do ambiente (superfície 3) que possui área muito maior que as superfícies 1 e 2. Também, deve-se quantificar a troca líquida entre uma superfície e outra, que é definido pela taxa total na qual a radiação atinge a superfície i oriunda de todas as superfícies.

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^n F_{ij} A_i J_i$$
 2.13

Efetuando as devidas substituições, da Equação 2.8 obtemos:

$$q_i = \sum_{j=1}^n \frac{J_i - J_j}{(A_i F_{ij})^{-1}}$$
 2.14

Essa equação pode ser igualada com a Equação 2.12.

Cada componente pode ser representado por um elemento em uma rede, para o qual $J_i - J_j$ é o potencial motriz e $(A_i F_{ij})^{-1}$ é a resistência geométrica. Essa rede de nós é mostrada na Figura 14.



Figura 14 – Representação da rede de troca radiante entre a superfície i e as superfícies restantes (adaptado B.R. Pacheco)

Para a quantificação da energia radiante incidente no leito, utilizaram-se dimensões conforme as mostradas na Figura 12. Além disso, a temperatura do aquecedor quando em funcionamento foi medida em torno de 570 °C (848 K) e o ambiente a 25 °C (298 K). As emissividades do aquecedor e do reator foram aproximadas para 0,9. O tempo mínimo necassário para o aquecimento do reator é aproximadamente 1020 segundos.

Após a execução dos cálculos conforme descrito anteriormente encontrou-se um fluxo radiante líquido na superfície do reator de aproximadamente 30 W/m².

2.1.1.2 CALIBRAÇÃO DO CONE DE IGNIÇÃO

A calibração do cone de ignição foi realizada para três alturas diferentes (0, 25 e 50 mm) em relação ao plano de base onde estavam localizados 13 termopares espaçados cincunferencialmente conforme pode-se ver na Figura 15.



Figura 15 – Termopares no plano basal

Após um determinado tempo de aquecimento do cone de ignição, os perfis de temperatura gerados pela aquisição das temperaturas de cada termopar atingiram o regime permanente.

Durante o aquecimento do cone de ignição gerou-se os perfis de temperatura de cada termopar localizado no plano basal. Os perfis foram plotados ao longo do tempo para as três alturas do cone em relação ao plano de base (Z), Figura 16.



Figura 16 – Perfis de temperatura (calibração do cone calorímetro)

Para cada altura de calibração do cone foram interpoladas e plotadas, com o auxílio dos comandos *griddata* e *surf* do software Matlab, as superfícies de temperatura para cada respectivo regime permanente conforme pode-se observar na figura 17.



a)



Figura 17 – Superfícies de Temperatura: a) Z=0mm; b) Z=25mm e c) Z=50mm

2.1.2 CÉLULA DE COMBUSTÃO

Um dispositivo experimental foi desenvolvido para a realização de experimentos 1-D co-corrente, figura 18. O leito consiste em um cilindro vertical de aço inoxidável, diâmetro interno de aproximadamente 73mm e altura 450mm. O diâmetro foi

projetado amplo o suficiente para limitar as perdas de calor através das paredes do reator, e ao mesmo tempo, estreito o suficiente para evitar a preparação de grandes amostras experimentais. O cilindro é rodeado por dois tipos de materiais isolantes térmicos: uma manta térmica (Superwool 607 blanket, Thermal Ceramics, condutividade térmica = 0.28 Wm⁻¹K⁻¹ a 982 °C) e 46 mm de espessura de fibras refratárias (Kaowool HS 45 Board, Thermal Ceramics, condutividade térmica = 0.21 Wm⁻¹K⁻¹ a 1000 °C). A figura abaixo mostra a correta configuração dos materiais isolantes obtida durante a montagem da célula de combustão.



Figura 18 – Montagem dos material isolante (manta térmica)

A grelha está localizada na parte inferior da câmara, e consiste de uma malha de aço inoxidável. É suportada por um anel interno, o qual por sua vez é suportado pelo cone inferior do reator. Na parte inferior da célula é colocado um tubo flexível de silicone ligado a borbulhadores para coletar o condensado. A entrada de ar é projetada para fornecer fluxo de ar ininterrupto em um forma simétrica. O analisador de gás pode ser momentaneamente ligado a duas saídas distintas, uma encontra-se na parte inferior do reator e a outra está na mesma altura dos termopares da coroa.

A pressão no topo do reator é continuamente registrada pelo software de aquisição de dados LabVIEW.

O reator é minuciosamente instrumentado. Um grupo de oito termopares em linha de 1,5 mm de diâmetro e 122 mm de comprimento (T1, T2, T3, T4, T11, T12, T13, T14) estão localizados em Z=0, 45, 90, 135 e 225, 270, 315, 360 mm (medindo do topo para o fundo do reator), permitindo medir a temperatura ao longo do eixo da célula em diferentes alturas. Uma coroa de seis termopares iguais aos descritos anteriormente, porém de 95 mm de comprimento (T5, T6, T7, T8, T9, T10), permite medir a temperatura ao longo de um plano horizontal que está localizado em Z=180mm. Esta disposição irá revelar se a frente de combustão progride ou não como uma superfície horizontal.



Figura 19 – Croqui da célula de combustão em meio poroso, com sistema de microamostragem (adaptado M.F. Martins)



Figura 20 – Seção transversal (A) Altura das entradas de ar (B) Altura da coroa de termopares (adaptado M.F.Martins)

2.1.3 ANALISADOR DE GÁS

Um novo instrumento adquirido pelo Laboratório de Combustíveis e Combustão foi ulizado para uma melhor investigação da frente de combustão. O instrumento em questão é o aparelho testo M/XL, fabricante CE, que tem a função de medir as porcentagens mássicas dos produtos gasosos da combustão O2, CO, NO, NO2, CXHY, H2 e NOX, com auxílio de células eletroquímicas, e a porcentagem mássica de CO2, com auxílio de uma célula infravermelho.



Figura 21 – Analisador de gás testo M/XL

O leito fixo fabricado para a realização deste presente trabalho permite duas configurações para a coleta de produtos gasosos da combustão, coleta na posição intermediária do leito ou na extremidade inferior doleito. A figura abaixo mostra ambas as configurações para coleta de gases.



Figura 22 – Configurações para coleta de produtos gasosos da combustão

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A combustão em meio poroso foi investigada experimentalmente em uma bancada de testes – ver figura abaixo. A bancada é formada pelo reator construído em aço inox, sistema de alimentação de ar comprimido, termopares previamente posicionados ao longo do reator, sistema de aquisição de dados (LabVIEW), cone calorímetro, analisador de gás e equipamentos auxiliares (cilindro de nitrogênio, rotâmetro, pressostato, exaustor, etc).



Figura 23 – Bancada de testes

A capela utilizada para comportar a célula de combustão é constituída por paredes em fibras de vidro. Na parte superior da capela acopla-se um exaustor para sucção dos gases da combustão, conforme mostrado na figura acima.

Neste projeto de graduação foram realizados 5 experimentos distintos para a calibração da célula de combustão minuciosamente instrumentada desenvolvida

para este trabalho. A tabela 1 mostra a características principais de cada experimento.

Experimento	Matéria prima	Proporção mássica	Vazão de ar	Velocidade de Darcy	Granulometria
1	Carvão e polietileno	10:2	0,676	0,038	2
2	Carvão	1	0,676	0,038	2
3	Carvão	1	0,151	0,008	2
4	Fezes humana	1	0,676	0,038	5
5	Carvão e areia	3:20	0,676	0,038	2
			Kg/h	m/s	mm

Tabela 1 – Características principais dos experimentos

3.1 SENSORES DE TEMPERATURA

São utilizados termopares como sensores de medição de temperatura, que são constituídos por dois condutores metálicos e distintos, puros ou homogêneos. Em uma de suas extremidades são unidos e soldados formando então uma junta de medição ou junta quente, enquanto a outra extremidade permanece aberta onde são feitas as devidas interligações de junta de referência. O aquecimento de dois metais diferentes com temperaturas diferentes em suas extremidades, gera o aparecimento de uma F.E.M. (da ordem de mV). Este princípio conhecido com efeito Seebeck propiciou a utilização de termopares para medição de temperatura. Os termopares escolhidos são do tipo K, esse tipo de termopar é o mais utilizado na indústria em geral, pois tem uma excelente resistência à oxidação em alta temperatura e à corrosão em baixas temperaturas. A figura mostra os termopares utilizados e sua disposição no interior do leito.



Figura 24 - Sensores de temperatura

3.2 TESTE HIDROSTÁTICO

Antes da execução dos experimentos é necessária a realização do teste hidrostático da célula para que possíveis vazamentos nas conexões dos termopares, juntas de silicone ou linhas de alimentação de ar sejam identificados e corrigidos para garantir a estanqueidade do equipamento.

O teste hidrostático foi realizado pressurizando-se o equipamento acima da pressão de operação por um período de aproximadamente cinco minutos. Dessa forma podese garantir que a vazão de ar medida pelo rotâmetro não se perderá por possíveis pontos fuga.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para uma execução segura e correta do processo experimental foi elaborado um roteiro contendo as etapas a serem seguidas para a realização dos experimentos. Vale lembrar ainda que cada experimento possui algumas peculiaridades inerentes à sua realização, por isso deve-se atentar para cada etapa de sua execução.

Roteiro Experimental

1. Pesar as massas de matéria-prima seguindo a proporção experimental;

- Parafusar a tampa inferior do leito juntamente com o anel de silicone e a manta térmica isolante;
- 3. Colocar os termopares em suas respectivas posições ao longo da célula;
- Colocar o coletor de amostragem de gás com duas opções para coleta (coroa e fundo do leito);
- 5. Inserir cuidadosamente no leito a matéria-prima com o auxílio de um funil;
- Imprimir na célula uma vibração forçada para conferir um melhor assentamento da matéria-prima;
- Posicionar o disco de quartzo corretamente entre os anéis de silicone e parafusar a tampa superior juntamente com as camadas de manta térmica isolante;
- 8. Conectar a linha de ar comprimido ao rotâmetro e ao reator;
- 9. Conectar a linha de gás inerte paralelamente à linha de ar comprimido;
- 10. Conectar o pressostato à célula e ao ambiente;
- 11. Ligar o pressostato na fonte de alimentação previamente ajustada para 24V;
- 12.Conectar os termopares e o pressostato no sistema de aquisição de dados Labview
- 13. Inserir um borbulhador na linha do analisador de gás, e pelo menos dois outros borbulhadores na saída da célula para coletar o condensado (caso necessário colocar os borbulhadores em um recipiente com gelo);
- 14.Posicionar o cone calorímetro na altura (Z) requerida e colocar uma manta isolante entre o cone e a janela de quartzo;
- 15. Ligar o exaustor;
- Ligar o cone a uma rede de alimentação 220V e começar a gravar a aquisição de dados;
- 17.Esperar o cone atingir temperaturas por volta de 425°C e remover a manta isolante entre o cone e a janela de quartzo;
- 18. Acompanhar a evolução do experimento e atentar para os valores de propriedades obtidos;
- 19. Após o resfriamento, remover os resíduos de leito e fazer a higienização do mesmo;
- 20.Desmontar toda a bancada experimental com atenção para não danificar nenhum dos componentes.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 ASPECTOS FÍSICOS

4.1.1 TEMPERATURA DO LEITO

Os valores de temperatura obtidos nas diferentes localizações no interior do leito para cada experimento estão ilustrados na figura 25. Pode-se observar que os experimentos que utilizam carvão com uma elevada fração mássica são altamente colapsantes (Experimentos 1, 2 e 3). Logo, estes experimentos apresentam um nível de ruído e instabilidade nos perfis de temperatura muito superior aos experimentos menos colapsantes (Experimentos 4 e 5), exigindo técnicas especiais, como ajuste de curvas e determinação de média ponderada nas regiões de pico, para a localização dos picos de temperatura para cada termopar e cálculo da velocidade da frente de combustão.



Figura 25 - Evolução de temperatura ao longo do tempo

Na seção horizontal da parte intermediária da célula, onde estão localizados os termopares da coroa (T5 a T10), pode-se ver que os picos de temperaturas foram significativamente inferiores dos picos ao longo do eixo da célula. Isto revela que a hipótese de uma situação puramente 1D não foi alcançada, o que pode ser atribuído a considerável perda de calor pelas paredes da célula. Esta observação indica que experimentos da literatura onde a frente de combustão é observada em reatores sem isolamento de menores diâmetros, as perdas de calor foram provavelmente muito superiores, e afetou significativamente a estrutura da frente de combustão.

A Figura 26 apresenta o perfil axial de temperatura ao longo do eixo do reator para diferentes tempos do Experimento 5. Esses perfis foram obtidos plotando – no tempo de pico de cada termopar – os valores de temperatura para todos os termopares.



Figura 26 – Perfil axial de temperatura ao longo do reator para diferentes tempos do Experimento 5

A partir do perfil de temperatura em um dado tempo, e as temperaturas das transformações envolvidas, uma primeira descrição geométrica da estrutura da frente pode ser estabelecida. Por exemplo, para o experimento 5, a Figura 27 mostra o perfil de temperatura axial ao longo do reator para o tempo de pico do termopar 5, instante de 7186 s, onde Z=0 foi fixado na TPP (temperatura de pico).

- Assumindo que a secagem torna-se muito rápida quando a temperatura atinge 150 °C, a zona de secagem pode ser localizada a jusante da tempetaruta de pico, começando a 160 mm da TP como ilustrado na figura 27.
- Pode-se assumir que a devolatilização progride significativamente a partir de 250 °C, e muito rapidamente a 550 °C. Consequentemente a zona de devolatilização pode ser localizada entre 115 mm e 145 mm a jusante da temperatura de pico; sua espessura é pequena, aproximadamente 30 mm.
- Para ocorrer a oxidação do carbono fixo, a temperatura deve ser superior a 550 °C, e oxigênio deve estar presente. O ar e fornecido a montante da frente de combustão, e uma quantidade relevante de oxigênio ainda está presente na saída da célula. A espessura da zona onde ambos os critérios são satisfeitos varia desde pequenos valores de Z até Z=115mm. No entanto, para pequenos valores de Z, existe a possibilidade de não haver carbono fixo presente. Neste estágio não é possível localizar onde a oxidação tem a taxa mais elevada, embora esteja provavelmente perto da temperatura de pico.



Figura 27 – Estrutura geométrica da frente de combustão

4.1.2 EVOLUÇÃO DE PRESSÃO NO TOPO DO LEITO

Como mostrado na Figura 28, para a maioria dos experimentos, a pressão no topo do leito primeiramente aumenta de forma progressiva até um determinado valor e, após isso, decresce até valores menores. Observa-se claramente que a queda de pressão ocorre logo após o aumento da temperatura no fundo da célula - comparar com figura 25 - que é justamente quando os voláteis condensados alcançam essa região e são evacuados. Assim, a pressão no leito é aliviada. Observa-se também que esse fenômeno ocorre em mais de uma etapa para os experimentos 1 (carvão e pet) e o 4 (fezes). Isso se deve ao fato de haver para esses dois experimentos uma maior variedade de substâncias, com diferentes reações, no leito.



Figura 28 – Evolução de pressão no reator ao longo dos experimentos

4.2 FRENTE DE COMBUSTÃO

4.2.1 FORMATO DA FRENTE DE COMBUSTÃO

A Figura 29 ilustra a superfície geométrica da frente de combustão para o experimento 5 gerada com o auxílio do software Matlab no instante em que a frente de combustão se encontra a aproximadamente na mesma altura dos termopares da coroa. Essa superfície foi obtida através dos tempos de pico de cada termopar da coroa e utilizando-se a velocidade da frente para encontrar a posição de cada ponto

no tempo médio entre os termopares da coroa. Observando esta superfície pode-se notar que a frente de propagação no experimento não é horizontal, mas sim inclinada, e propaga-se mais rapidamente nas periferias do leito.



Figura 29 - Formato da frente de combustão - (a) Vista frontal e (b) Vista superior

O fato dessa frente não se propagar de maneira uniforme pode ser resultado de um fluxo de calor por radiação não uniforme durante a ignição. Instabilidades devidas ao processo de ignição ou de perda de calor através das paredes pode também contribuir para a não uniformidade desse perfil.

Além disso, olhando para os resultados da figura 25 (perfil de temperatura do 5° exp. Coluna+coroa), está claro que a frente alcançou o primeiro termopar da coroa antes

do que provavelmente alcançaria o eixo da célula na mesma altura Z do leito. Este resultado confirma que a frente não é uma superfície plana, mas uma superfície curva com o topo no eixo de simetria do leito. Consequentemente, a frente provavelmente tem o formato conforme ilustrado na figura 29. Uma outra possível justificativa para o progresso da frente pode estar no fornecimento de O_2 . O fluxo de massa de O_2 perto das paredes frias é, provavelmente, superior ao do eixo, porque:

- A densidade do O₂ é maior nas peredes, devido a menor temperatura;
- A viscosidade é menor, também devido a menor temperatura;
- O arranjo das partículas em contato com as peredes não é tão denso quanto o restante da célula.

Isso pode explicar o progresso mais rápido da frente nas paredes do que na célula de combustão.

4.2.2 VELOCIDADE DA FRENTE DE COMBUSTÃO

A velocidade da frente de combustão foi determinada a partir dos dados gerados pela passagem da frente em cada termopar no eixo da célula. Uma função polinomial quadrática dando a posição da frente de combustão em função do tempo foi ajustada aos pontos experimentais, com mostrado na Figura 6-A. O r² variou de um mínimo de 0.991033, para o experimento 4, até o máximo de 0.998171, para o experimento 5, indicando que as curvas estavam relativamente ajustadas. A derivada em relação ao tempo nos dá a velocidade da frente de combustão, como mostrado na Figura 30-B. Pode-se observar que, de uma maneira geral, para os experimentos que não tiveram muito ruído devido às constantes quedas do leito, a velocidade é uma função crescente (experimentos 4 e 5). Al-Saffara et al. [8], Torero e Fernandez-Pello [4] e Martins et al. [2] encontraram um resultado similar. Entretanto, nos experimentos mais colapsantes, ou seja, onde a queda do leito era constante devido a passagem da frente (experimentos 1,2 e 3), os ruídos provocam alterações nos perfis de velocidade no sentido de desacelerar a frente de combustão.



Figura 30 - (A) Curvas posição x tempo (B) Velocidade da frente em mm/min

4.3 ANÁLISE DE GÁS

A análise de gás foi realizada para os experimentos 2, 3, e 4. Na saída do reator as curvas obtidas são mostradas na Figura 31. Observa-se a existência de dois regimes de combustão presentes na célula. No início do experimento há uma tendência para a combustão limitada pelo oxigênio, uma vez que a quantidade de oxigênio na saída é zero ou próximo de zero. Já na parte final do experimento, observa-se a combustão limitada pela reação, visto que o oxigênio está presente em quantidade considerável na saída da célula. No experimento 4 foi possível realizar uma análise mais completa dos constituintes do gás na saída da célula, valendo lembrar que

quantidades consideráveis de CxHy (bem maiores do que 5 %) também estavam presentes em todos os experimentos, não sendo, no entanto, possível mensurá-las devido ao limite da célula eletroquímica de CxHy ter sido ultrapassado. Nota-se também que há grande concentração de CO e H2 o que pode indicar que também ocorreram reações de gaseificação no leito.

Na coroa foram encontrados as curvas mostradas na Figura 32, para o experimento 2 e 3. No experimento 2 observa-se uma grande variação nas quantidades de oxigênio e gás carbônico, que pode ser devido aos constantes desmoronamentos de parte do leito em cima do sistema de micro-amostragem. Nota-se que nos intervalos dos picos de CO₂ e vales de O₂, ou seja, nos momentos onde as reações de combustão estão ocorrendo logo na entrada do sistema de micro-amostragem, há um regime de combustão limitada pela reação, que pode ser confirmado pelo oxigênio presente em valores consideráveis (cerca de 5%). No experimento 3 a amostragem foi realizada muito antes da frente alcançar a coroa, por isso os resultados são bem estáveis. O total consumo de oxigênio pela frente, que está logo acima da amostragem de gás, confirma que no início do experimento realmente há um regime de combustão limitada pelo oxigênio, conforme mencionado anteriormente.



Figura 31 - Análises de gás na saída do reator



Figura 32 - Análises de gás na coroa

CONCLUSÕES

Diante das mais diversificadas situações que ocorreram durante as várias etapas do projeto de pesquisa, foram colocados em teste parâmetros como, criatividade, conhecimentos, habilidades e capacidade de raciocínio dos autores desta pesquisa, que somadas foram cruciais para o desenvolvimento deste projeto.

Os experimentos deram resultados significantes. A geometria da frente tende a ser não uniforme com leves inclinações e se propaga mais rapidamente nas periferias do leito devido a fatores como instabilidades devidas ao processo de ignição ou de perda de calor através das paredes, resultando num maior fornecimento de O2 próximo as paredes. Apesar de o diâmetro relativamente grande da célula e um bom isolamento térmico, as perdas de calor foram significantes em relação ao calor gerado pela combustão.

A velocidade da frente é uma função crescente. No entanto, em leitos onde constantes desmoronamentos ocorrem, devido a sua passagem, a velocidade se torna decrescente. Quedas no leito, devido à formação das cinzas, desaceleram a frente consideravelmente.

A partir dos perfis de temperatura estabelecidos, pode ser feita uma descrição geométrica da zona de secagem, zona de devolatilização, e de oxidação, se estas existirem, bem como de outras que por ventura venham a existir a depender do combustível utilizado.

O sistema de micro amostragem permite identificar os gases no interior da frente e caracterizá-la quimicamente e geometricamente. Observou-se uma tendência ao aparecimento de dois regimes de combustão na célula. No início há combustão limitada pelo oxigênio e no final combustão limitada pela reação. O regime de combustão em todos os experimentos produziu uma concentração considerável de CO e H2 indicando que ocorrem reações de gaseificação.

A pressão no interior do leito tende a aumentar, devido ao acúmulo de condensados no interior do leito, até o momento em que estes alcançam o final da célula e são evacuados fazendo com que a pressão decresça.

Portanto, com este novo dispositivo experimental para estudos unidimensionais, a propagação de uma frente de combustão, para diferentes combustíveis sólidos, com alimentação de ar co-corrente e contracorrente poderá ser estudada e analisada.

Pode-se estudar também neste dispositivo a aplicabilidade de diferentes resíduos sólidos como fonte alternativa de energia. Demonstrando que a aplicabilidade de métodos de reaproveitamento de resíduos pode ser muito mais que um bem para o planeta, ou fonte de renda, podendo vir a tornar-se a melhor maneira de se tentar fechar o ciclo de extração, produção, consumo e descarte dos materiais que são diariamente consumidos, esgotando toda e qualquer capacidade que o planeta pode ter de se renovar.

PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS

Depois do projeto realizado e dados coletados, sugerimos, que se possível, hajam estudos para melhoramentos do equipamento para futuros projetos, bem como as eficiências do mesmo.

Realizar ensaios com os diversos tipos de materiais plásticos, com o intuito de se caracterizar os produtos e subprodutos gerados, assim como a eficiência energética que pode ser obtida de cada material, para possibilitar um método de transformação e reaproveitamento dos resíduos plásticos gerados pela sociedade, reduzindo o impacto que eles geram ao meio ambiente.

Além disso, pode-se realizar ensaios objetivando estudar minuciosamente a frente de combustão nos seus mais variáveis aspectos, como por exemplo, caracterização química e geométrica da frente, caracterização física, entre outros.

Embora se tenha dado foco ao arranjo co-corrente, onde os resultados foram obtidos de modo satisfatório, a célula também permitirá estudos futuros no arranjo contracorrente, tendo em vista que foi também projetada para esta configuração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] H. Thunman, B. Leckner Co-current and counter-current fixed bed combustion of biofuel – a comparison, 2003.

[2] M.F. Martins, S. Salvador, J.-F. Thovert, G. Debenest Co-current combustion of oil shale - part 2: Structure of the combustion front, 2009.

[3] D. Shin, S. Choi The combustion of simulated waste particles in a fixed bed, 2000.

[4] J.L. Torero, A.C. Fernandez-Pello Forward smolder of polyurethane foam in a forced air flow, 1996.

[5] T.J. Ohlemiller Modeling of smoldering combustion propagation, 1985.

[6] M.L. Hobbs, P.T. Radulovic, L.D. Smoot Combustion and gasification of coals in fixed-beds, 1993.

[7] Y.B. Yang, C. Ryu, A. Khor, N.E. Yates, V.N. Sharifi, J. Swithenbank Effect of fuel properties on biomass combustion. Part II. Modelling approach - identification of the controlling factors, 2005.

[8] H. Al-Saffara, D. Priceb, A. Soufia, R. Hughesa Distinguishing between overlapping low temperature and high temperature oxidation data obtained from a pressurised flow reactor system using consolidated core material, 2000.

[9] L. Liang, R. Sun, J. Fei, S. Wu, X. Liu, K. Dai et al. Experimental study on effects of moisture content on combustion characteristics of simulated municipal solid wastes in a fixed bed, 2008.

[10] Pironi P, Switzer C, Rein G, Gerhard JI, Torero JL, Fuentes A. Small-scale forward smouldering experiments for remediation of coal tar in inert media, 2009.

[11] http://www.cimento.org/site/coprocessamento.htm

[12] http://www.cesec.ufpr.br/metalica/01/01-texto.htm

[13] Bruno R. P. Simulação Numérica Unidimensional da Combustão em Meio Poroso Reativo.

[14] M.F.Martins The structure of a combustion front propagating in a fixed bed of crushed oil shale: co-current configuration