

PROJETO E TESTES A FRIO DE INCINERADOR DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS UTILIZANDO COMBUSTOR PULSANTE COM CONTROLE ATIVO

Cesar Augusto Botura

Unesp – Campus de Guaratinguetá – Av. Ariberto Pereira da Cunha 333 – Guaratinguetá – SP, CEP 12516-410
cesar@cptec.inpe.br

João Andrade de Carvalho Jr.

Unesp – Campus de Guaratinguetá – Av. Ariberto Pereira da Cunha 333 – Guaratinguetá – SP, CEP 12516-410
joao@feg.unesp.br

Galdenoro Botura Jr.

Unesp – Campus de Guaratinguetá – Av. Ariberto Pereira da Cunha 333 – Guaratinguetá – SP, CEP 12516-410
joao@feg.unesp.br

Marco Aurélio Ferreira

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Rodovia Presidente Dutra km 40 - Cachoeira Paulista – SP, CEP 12630-000
marco@lcp.inpe.br

Resumo. O propósito deste trabalho é mostrar os passos seguidos para o projeto de um incinerador de resíduos sólidos que utilizará a técnica de combustão pulsante. O sistema é composto de um forno rotativo e de uma câmara de pós combustão. Testes a frio são discutidos; os mesmos indicam que o sistema como idealizado é passível de excitação acústica com controle ativo.

Palavras chave: incineração, resíduos, combustão pulsante.

1. Introdução

Incineração é um processo que utiliza decomposição térmica via oxidação em altas temperaturas (900 °C ou mais) para destruir a fração orgânica de resíduos, reduzindo substancialmente seu volume. Em princípio, qualquer resíduo é passível de ser incinerado, até mesmo água contaminada e lamas (Dempsey e Oppelt, 1993).

Diferentes tecnologias de incineração foram desenvolvidas para tratar os vários tipos e as várias formas de resíduos. Uma das mais freqüentemente utilizadas é aquela de fornos rotativos acoplados a câmaras de pós combustão (Dempsey e Oppelt, 1993; Brunner, 1991; Bonner et al., 1981; Niessen, 1978). Essas unidades, em geral, servem para incinerar resíduos sólidos, líquidos e lamas. Os compostos orgânicos dos resíduos são vaporizados e parcialmente consumidos pela combustão na câmara primária (forno rotativo) e os gases resultantes e grande parte dos particulados são destruídos ou descontaminados na câmara secundária (de pós combustão) (Owens et al., 1991).

Devido às exigências relacionadas com o meio ambiente e ao custo do processo de incineração, a pesquisa de novas tecnologias de incineração é de fundamental importância. A combustão pulsante fornece um meio de acelerar alguns passos do processo de incineração e então aumentar a probabilidade de completa combustão na unidade. Desta forma, pode-se aproveitar as vantagens observadas na combustão pulsante na incineração de resíduos sólidos, utilizando as técnicas de controle ativo para gerar, amplificar e controlar as oscilações acústicas no incinerador. O resultado da adição de um combustor pulsante pode produzir os seguintes benefícios (Stewart et al., 1993): a) redução do excesso de ar requerido para queimar uma dada quantidade de resíduo, b) aumento da capacidade de incineração da unidade, c) redução ou eliminação dos “puffs” produzidos durante a operação transiente; d) redução da quantidade de combustível auxiliar que necessita ser aplicada aos queimadores do incinerador.

2. Estado da Arte da Incineração de Resíduos Sólidos

Incineradores para destruição de resíduos sólidos são difíceis de projetar e operar, primariamente devido à natureza do resíduo, que pode variar muito em composição e características físicas, o que torna praticamente impossível controlar parâmetros de combustão como função da taxa de alimentação do resíduo (Brunner, 1991).

Resíduos sólidos são em geral processados em três tipos diferentes de unidades de incineração: a) fornos de fundo fixo, b) leitos fluidizados, e c) fornos rotativos (Dempsey e Oppelt, 1993; Brunner, 1991; Bonner et al., 1981; Niessen, 1978). Há outros modos bastante ineficientes de incineração de sólidos, como utilizar-se de combustão a céu aberto ou em câmara única sem fluidização (Brunner, 1991).

Incineradores de fundo fixo ou pirolíticos usam processo de combustão em dois estágios (Dempsey e Oppelt, 1993; Brunner, 1991; Bonner et al., 1981; Niessen, 1978). O resíduo é alimentado na primeira câmara, onde é queimado com 50 a 80 % da vazão de ar estequiométrica. As condições de falta de ar decompõem piroliticamente a maior parte da matéria volátil do resíduo. A fumaça e os produtos pirolíticos, consistindo primariamente de CO e hidrocarbonetos gasosos são destruídos na segunda câmara, onde o ar é adicionado para completar a combustão. Na primeira câmara, as reações de combustão são mantidas em níveis baixos para minimizar o transporte de particulados.

A grande limitação de incineradores de fundo fixo é o difícil transporte do resíduo ao longo da câmara de combustão (Dempsey e Oppelt, 1993). A principal vantagem dos mesmos é a característica de gerar quantidades reduzidas de particulados. Os incineradores a leito fluidizado compreendem uma câmara de combustão parcialmente ocupada com partículas de areia, alumina, carbonato de sódio, dentre outras (Dempsey e Oppelt, 1993; Brunner, 1991; Bonner et al., 1981; Niessen, 1978). O ar de combustão é fornecido através de uma placa distribuidora na base do combustor, em uma taxa suficiente para fluidizar o material. O excesso de ar é normalmente mantido na faixa de 100 a 150 %.

Os incineradores a leito fluidizado são geralmente usados para lamas e sólidos picotados (Dempsey e Oppelt, 1993). De modo a permitir a boa distribuição de resíduos no interior do leito e a remoção dos produtos de combustão, todos os sólidos exigem uma pré filtragem ou trituração a fim de reduzir o tamanho das partículas a menos de 5 cm de diâmetro. Os incineradores a leito fluidizado apresentam altas razões gás/sólido, altas eficiências de transferência de calor, intensa turbulência nas fases gasosa e sólida, temperaturas uniformes ao longo do leito e o potencial de neutralização de gás ácido in situ através da introdução de barrilha ou carbonato. Entretanto, podem apresentar a tendência para o aumento da concentração de particulados se forem alimentados resíduos com altos teores de sais ou se houver um baixo tempo de residência no interior da câmara.

Fornos rotativos constituem o tipo mais versátil de incineradores, uma vez que podem ser usados na destruição de resíduos sólidos ou líquidos, lamas e resíduos em recipientes (Dempsey e Oppelt, 1993; Brunner, 1991; Bonner et al., 1981; Niessen, 1978). O forno rotativo é uma câmara cilíndrica, cuja rotação transporta o resíduo ao longo da câmara. O tempo de residência dos sólidos na câmara é em geral de 0,5 a 1,5 hora, controlável pela taxa de alimentação de resíduos e pela velocidade de rotação, esta tipicamente entre 0,5 e 1 rotação por minuto. A taxa de alimentação é ajustada para manter o volume de resíduos em processamento no máximo em 20 % do volume interno da câmara.

A função primária do forno rotativo é converter resíduos sólidos em gases, o que ocorre através de uma série de processos de volatilização, destilações destrutivas e reações parciais de combustão (Dempsey e Oppelt, 1993). O forno rotativo pode operar com excesso de ar de 50 a 250 %. Necessita-se do pós queimador, como no caso dos incineradores de fundo fixo, para completar as reações de combustão na fase gasosa, e o excesso de ar nesta câmara pode variar de 120 a 200 %.

Os consumos específicos de combustível auxiliar dependem do resíduo a ser incinerado, da temperatura de processo desejada e do excesso de ar necessário. Um resíduo líquido com poder calorífico inferior acima de 3000 kcal/kg é capaz de sustentar sua própria combustão, desde que injetado finamente nebulizado em uma câmara quente (CETREL, 1991). Valores para a razão combustível auxiliar/resíduo em massa são da ordem de 1/3,5 para resíduos aquosos incinerados com óleo combustível, na temperatura de 1000 °C e excesso de ar de 25 % (Carvalho e Gotaç, 1993), e 1/2 para resíduos sólidos incinerados com gás natural, na temperatura de 900 °C e excesso de ar de 90 % (Melo et al., 1998).

Valores das taxas de emissões de poluentes variam muito, conforme o tipo de resíduo e de incinerador. Para fornos rotativos, a referência (Dempsey e Oppelt, 1993) cita os seguintes valores, para diversas unidades da década de 80, sem correção para 7 % de O₂: CO entre 6 e 800 ppm, material particulado entre 150 e 400 mg/m³, hidrocarbonetos não queimados entre 1 e 8 ppm, e destruição de HCl acima de 99,8 %. A NB-1265 (ABNT - NB-1265, 1989) determina os seguintes padrões de emissão: a) HCl: 1,8 kg/hora ou 99 % de remoção de HCl para resíduos que contenham mais de 0,5 % de Cl; b) CO: 100 ppm, corrigido a 7 % de O₂, exceto para um intervalo inferior a 10 minutos, desde que não seja ultrapassado o limite superior de 500 ppm, corrigido para 7 % de O₂, em qualquer período de 1 hora; c) SO_x (medido como SO₂): 280 mg/Nm³, corrigido a 7 % de O₂; d) NO_x (medido como NO₂): 560 mg/Nm³, corrigido a 7 % de O₂; material particulado total: 70 mg/Nm³, corrigido a 7 % de O₂. A fração do resíduo não convertida presente no rejeito sólido efluente do forno rotativo depende da quantidade de material incombustível presente no resíduo bem como do tamanho inicial das partículas inseridas no incinerador.

A fração do resíduo não convertida presente no rejeito sólido efluente do forno rotativo depende da quantidade de material incombustível presente no resíduo bem como do tamanho inicial das partículas inseridas no incinerador. O solicitante da presente proposta não encontrou valores típicos para esta fração na literatura. Conforme mencionado no texto da Introdução, a combustão pulsante pode produzir benefícios que ajudem a superar algumas das dificuldades existentes na incineração de resíduos sólidos. Alguns benefícios da combustão pulsante incluem melhoria da mistura de combustível e oxidante, maior taxa de transferência de calor aos arredores, reações em temperaturas mais altas, e combustão mais eficiente com reduzido excesso de ar, levando, na maioria dos casos, a reduzidas emissões de poluentes e a significativa economia de combustível (Belles, 1979; Carvalho, 1983; Zinn, 1992; McQuay et al., 1998; Martins et al., 1999).

3. Aplicações do forno rotativo

O forno rotativo pode queimar uma grande variedade de resíduos; entretanto, existem limitações (Brunner, 1991). As vantagens e desvantagens do uso de um forno rotativo são listadas a seguir.

Vantagens

- capacidade de incinerar uma larga variedade de resíduos;
- pré-processamento mínimo do resíduo;
- existência de técnicas para a direta alimentação de resíduos em barris de metal;
- capacidade de incinerar uma variedade de tipos de resíduo (sólidos, líquidos, lamas, etc.) ao mesmo tempo;
- disponibilidade de uma variedade de mecanismos de alimentação (empurradores, rosca sem fim, alimentação por gravidade, injeção direta de líquidos e lamas, etc.);
- fácil controle do tempo de residência do resíduo no forno;
- provisão de alta turbulência e efetivo contato com ar dentro do forno;
- pequena capacidade ou incapacidade de controlar as condições ao longo do comprimento do forno em um forno convencional;
- turbulência e contato efetivo entre resíduo e ar de combustão.

Desvantagens

- carreamento de particulados para o fluxo de gás por causa da turbulência do fluxo de resíduos;
- normalmente um pós-queimador é necessário para a destruição de voláteis;
- necessita de uma relativamente alta quantidade de excesso de ar, nominalmente de 100 a 150 % do ar estequiométrico;
- dificuldade de manter um selo efetivo no forno;
- quantidade significativa de calor perdida na descarga da cinzas.

4. Sistema forno rotativo – câmara secundária – combustor pulsante

Na presente seção procurou-se dimensionar e avaliar as condições de operação de um forno rotativo para incineração de resíduo sólido. Este cálculo preliminar segue o procedimento e as recomendações de Carvalho e Gotaç (1993) e foram baseados nos balanços de massa e energia, considerando a reação como ocorrendo em apenas uma etapa. O combustível considerado foi o gás natural, cuja composição é a mostrada na Tab. (1).

4.1. Balanço de massa

A reação estequiométrica do gás natural com ar é escrita como:

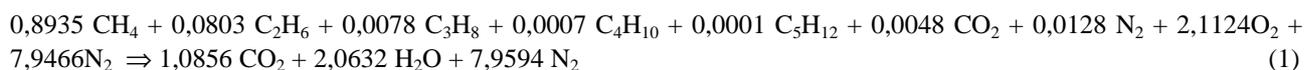


Tabela 1 – Composição do gás natural (Comgás, 2002).

Componente	Fórmula	Porcentagem Volumétrica
Metano	CH ₄	89,35 %
Etano	C ₂ H ₆	8,03 %
Propano	C ₃ H ₈	0,78 %
Iso-Butano	C ₄ H ₁₀	0,04 %
N-Butano	C ₄ H ₁₀	0,03 %
Pentano	C ₅ H ₁₂	0,01 %
Dióxido de Carbono	CO ₂	0,48 %
Nitrogênio	N ₂	1,28 %

4.2. Tempo de residência

Exprime-se o tempo de residência, t_r , pela seguinte relação:

$$t_r = \int_V \frac{dV}{q}, \quad (2)$$

onde V é o volume da câmara de combustão e q a vazão volumétrica do gás. Sendo considerado o fluxo como unidimensional e o gás como perfeito, temos:

$$t_r = \frac{V.P.M}{R.T_f.m_t}, \quad (3)$$

sendo P a pressão, M a massa molecular média dos gases de saída, \bar{R} a constante universal dos gases (0,08206 atm.l/K.mol) e m_t a vazão mássica total dos gases. A pressão no interior da câmara foi utilizada para projeto como sendo 1 atm.

4.3. Número de Reynolds do fluxo gasoso

Recomenda-se que uma câmara de combustão, no caso forno rotativo, seja projetada de forma que o fluxo gasoso seja turbulento, com um número de Reynolds, Re, superior a 5000 (Bonner et al., 1981). O seu valor calculado pode então ser interpretado como um fator de mérito do incinerador. Para uma câmara de combustão cilíndrica, que pode também ser aplicado ao forno rotativo, sua expressão é:

$$Re = \frac{\rho.v.D}{\mu} = \frac{4.m_t}{\pi.\mu.D}, \quad (4)$$

onde ρ , v e μ são, respectivamente, a massa específica média, velocidade média e viscosidade dos gases à temperatura T_f e D o diâmetro da câmara.

4.4. Dimensionamento da câmara de combustão

As condições de projeto adotadas para o dimensionamento do forno rotativo são mostradas na Tab. (2).

Tabela 2 – Dados para projeto da câmara.

Tempo de residência (gás)	3 s
Tempo de residência (sólidos)	90 min
Temperatura da câmara	800 °C
Vazão mássica de gás	75 g/s
Pressão no interior da câmara	1 atm
Inclinação	1° a 3°

O volume calculado do forno é de 712 litros, com uma razão comprimento/diâmetro igual a 5,45 ($L/d = 5,45$). Desta forma seu comprimento será de 3 m e diâmetro de 0,55 m. Para este diâmetro, utilizando a equação (4), tem-se um número de Reynolds igual a 3955. A compensação do número de Reynolds abaixo de 5000 é realizada com as melhores taxas de mistura entre oxidante e combustível obtidas com as oscilações acústicas.

Um esquema do sistema proposto é mostrado na Fig. (1), que mostra um combustor de frequência sintonizável acoplado ao forno rotativo e alto falantes acoplados à câmara secundária.

5. Incineração de resíduos sólidos com combustão pulsante

Os processos de incineração são cada vez mais utilizados no tratamento de resíduos. O aumento na taxa de produção de resíduos de uma empresa esta intimamente ligada à sua expansão. Desta forma, pode-se aproveitar as vantagens observadas na combustão pulsante na incineração de resíduos industriais sólidos, utilizando as técnicas de controle ativo para amplificar as oscilações acústicas no incinerador. O resultado da adição de um combustor pulsante pode produzir os seguintes benefícios (Stewart et al., 1993): a) redução do excesso de ar requerido para queimar uma dada quantidade de resíduo, b) aumento da capacidade de incineração da unidade, c) redução ou eliminação dos “puffs” produzidos durante a operação transiente; d) redução da quantidade de combustível auxiliar que necessita ser aplicada aos queimadores do incinerador.

Incineração de resíduo sólido ou algum meio contaminado como solo, envolve alguns passos. Primeiro, o calor fornecido por convecção e radiação dos gases adjacentes, chamas e paredes pirolizam o resíduo. Os vapores liberados então se misturam e reagem com o oxigênio disponível. Para oxidar completamente o resíduo, estas reações precisam se processar inteiramente durante o tempo de residência dos gases dentro do incinerador. Assim, para atender às regulamentações vigentes, é necessário garantir a destruição dos principais constituintes orgânicos perigosos e a minimização de produtos de combustão incompleta.

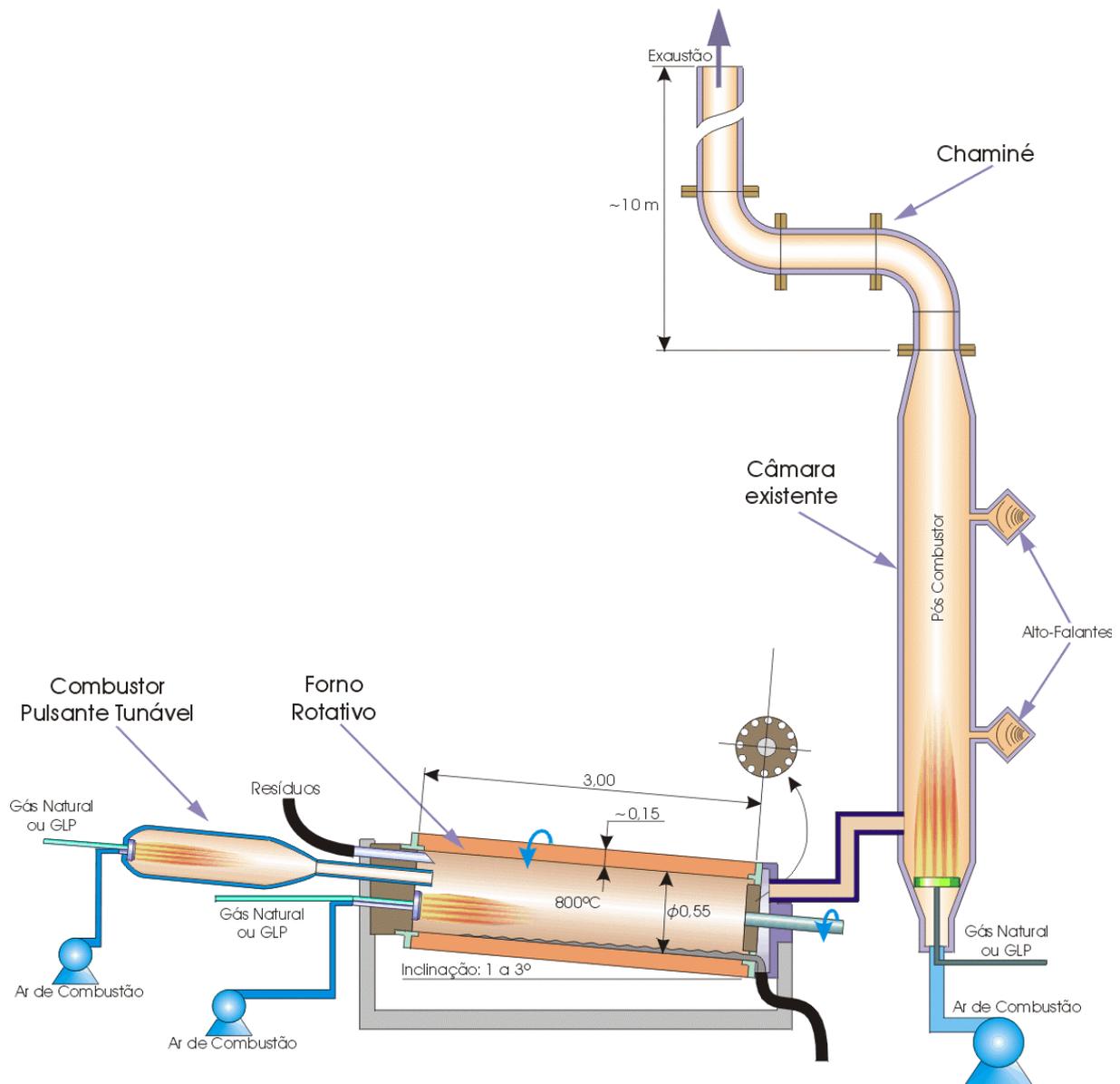


Figura 1 – Sistema forno rotativo/câmara secundária.

A tecnologia da combustão pulsante fornece um meio de acelerar alguns passos do processo de incineração e então aumentar a probabilidade de completa combustão na unidade de incineração.

Um combustor pulsante consiste basicamente de uma entrada de ar, uma seção do combustor e um tubo reto. Sua operação é caracterizada por variações periódicas da pressão e velocidade dos gases dentro do combustor e no tubo reto. Combustão pulsante ocorre espontaneamente após a ignição. A frequência das pulsações é geralmente acoplada com a frequência do modo acústico fundamental do combustor. Se adequadamente adaptado, um combustor pulsante pode excitar grandes amplitudes de pulsação em um processo. Combustores pulsantes de frequência tunável tem sido usados para excitar pulsações de grandes amplitudes em processos industriais (Stewart et al., 1993), com aplicação em incineradores, secadores, calcinadores, gaseificadores. O princípio de funcionamento desses combustores é ilustrado na Fig. (2).

A Fig. (2) mostra um combustor descarregando um fluxo pulsante de produtos de combustão em uma câmara. A função do combustor pulsante é suprir o calor requerido pelo processo, e excitar grandes amplitudes de pulsação no processo, melhorando a performance do equipamento. Para excitar grandes amplitudes de pulsação em um processo industrial, o combustor pulsante precisa ser operado em uma frequência igual à frequência de um dos modos acústicos naturais do processo. Quando esta condição é satisfeita, as pulsações dentro do combustor pulsante e do processo estão em ressonância. Grandes pulsações provenientes de ressonância são alcançadas através da colocação de um combustor pulsante tunável em uma parede do processo, e variando sua frequência até igualar a frequência de um modo acústico natural do processo. A condição de operação ressonante desejada é estabelecida por tentativa e erro. Um transdutor de pressão monitora as trocas nas amplitudes das oscilações dentro do processo em resposta à variação de frequência do combustor pulsante. A condição de operação desejada é alcançada quando este transdutor indica que a amplitude das pulsações dentro do processo tiver atingido um valor máximo.

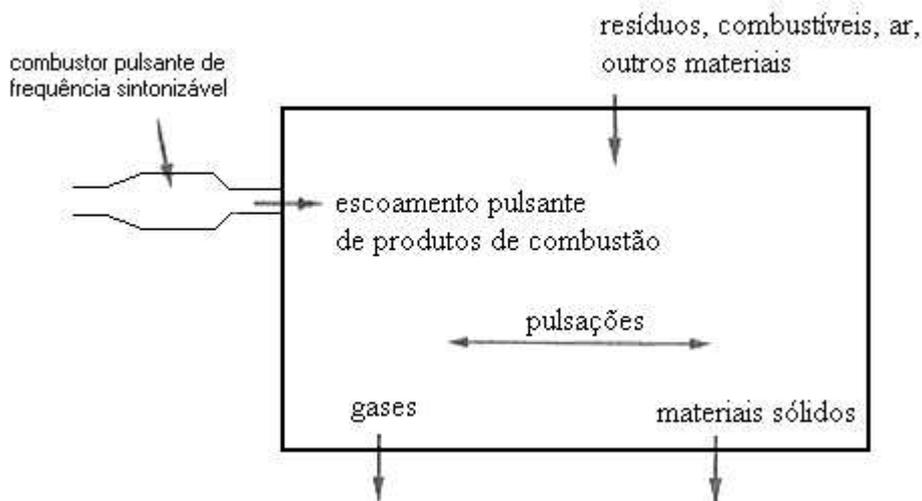


Figura 2 – Esquema de câmara com oscilações excitadas por combustor pulsante de menores dimensões (Stewart et al., 1993).

A aproximação de tentativa e erro deve ser usada porque as frequências de ressonância de todos os processos industriais não podem ser previstas, isto por causa da geometria dos equipamentos, propriedades não uniforme dos gases e condições de operação flutuante, por exemplo temperatura. Consequentemente, combustores pulsantes de frequência tunável são projetados para serem operacionais em uma faixa de frequências na qual se incluem (baseados em cálculos aproximados e/ou medidas) um ou mais modos acústicos naturais de frequência do processo. Usando o procedimento descrito acima, o combustor pulsante pode ser ajustado no local para operar na frequência de ressonância do processo de interesse.

Fornos rotativos são os tipos mais comuns de incineradores de resíduos perigosos comercialmente em uso, além de ter a vantagem de efetivamente queimar uma larga faixa de resíduos, sólidos e líquidos. Uma das desvantagens associadas com incineradores do tipo forno rotativo é a limitada opção de readaptação para avançadas tecnologias de combustão. Isto é devido à necessidade de manter um selo efetivo entre as partes rotativas e não rotativas (Stewart et al., 1993). Fornos rotativos podem ser facilmente convertidos através de adaptação de um combustor pulsante de dimensões menores.

Caso não sejam obtidos resultados satisfatórios com o combustor de frequência tunável, serão utilizados alto falantes ou cornetas para gerar as oscilações acústicas no forno rotativo. Alto falantes produziram bons resultados em combustor experimental tipo tubo de Rijke, na queima de combustíveis líquidos (Dubey et al., 1997; Dubey et al., 1998).

6. Projeto do combustor de frequência sintonizável

O combustor de frequência sintonizável, a ser utilizado para gerar as oscilações acústicas no forno rotativo, é o coração do sistema. Já foi construído, conforme o desenho da Fig. (3) e mostrado em detalhe nas Fig. (4). O combustor utilizará um pequeno queimador de gás natural, com a potência entre 3 e 5 % do forno rotativo. Pretende-se construir uma montagem de tal maneira a variar o comprimento do tubo combustor entre 1,0 e 1,8 m, para variar a frequência natural do sistema. Se necessário, um alto falante será acoplado ao tubo combustor para auxiliar a excitação das ondas acústicas.

7. Testes a frio do sistema

Ensaio preliminares foram executados com o combustor sintonizável para levantamento de perfil de pressão interno ao conjunto caixa de saída – forno rotativo – caixa de entrada. Para tal, colocou-se o combustor sintonizável na posição inicial zero que corresponde ao tubo interno que está acoplado ao alto-falante estar totalmente dentro do tubo externo, conforme demonstrado na Fig. (4). Um gerador de funções, ligado a um amplificador de som foi conectado ao alto-falante. Para diferentes frequências, foi medida a pressão na caixa de saída. Variando-se o comprimento do combustor sintonizável, através do deslocamento do tubo interno, verificou-se o maior valor obtido de pressão na caixa de saída. A partir daí, deslocou-se um tubo com um transdutor de pressão na ponta (Figura 4), percorrendo todo o comprimento formado pelo sistema caixa de saída – forno rotativo – caixa de entrada. A pressão na caixa de saída com suas respectivas frequências é mostrada na Tab. (3). Os perfis de amplitude pressão como função da distância a partir da entrada do forno rotativo são mostrados nas Fig. (5 – 13).

Sistema forno rotativo - câmara secundária

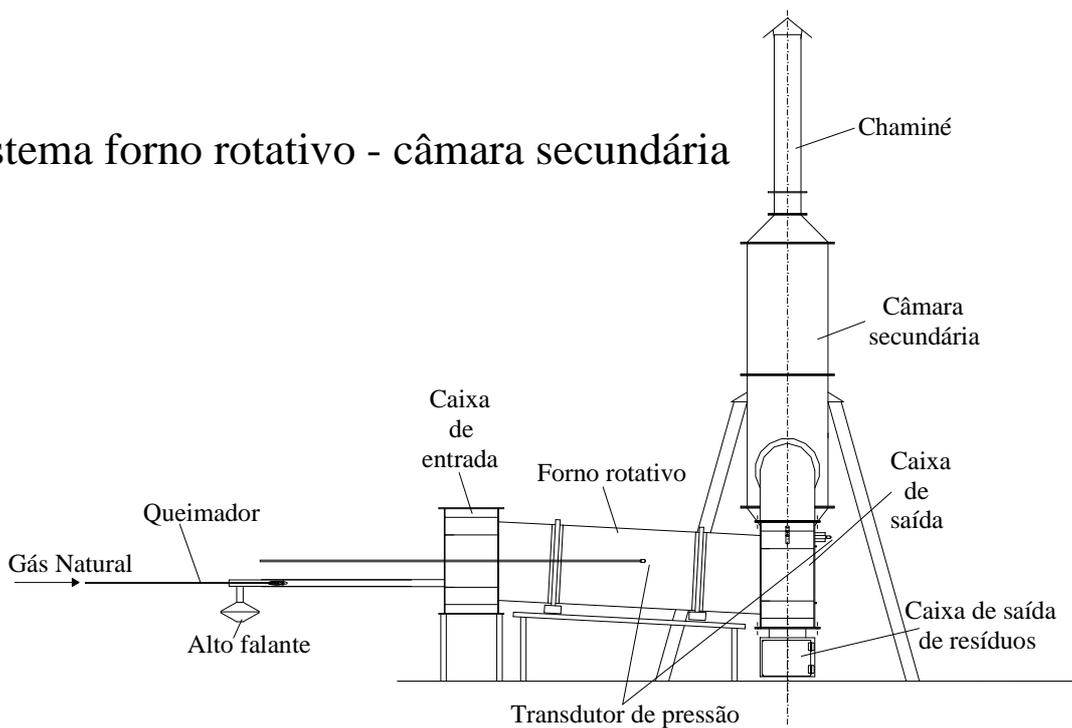


Figura 3 – Esquema do sistema de incineração com o combustor de frequência sintonizável.

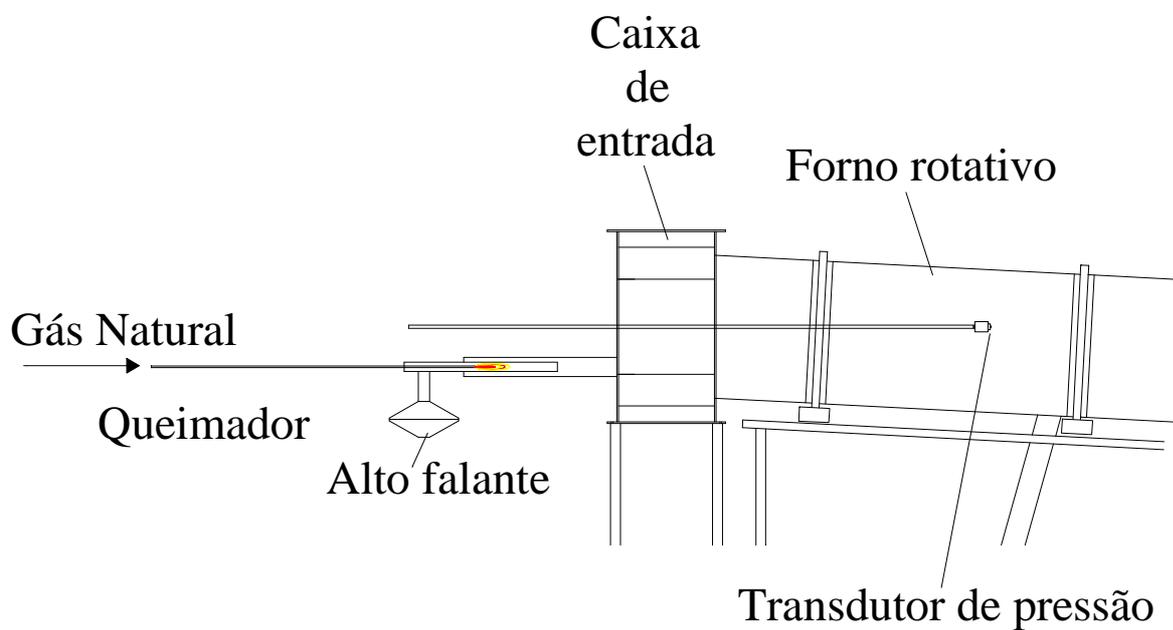


Figura 4 – Esquema do combustor de frequência sintonizável. (Detalhe)

Tabela 3 – Pressão na caixa de saída

Frequência de excitação(Hz)	Pressão na caixa de saída (mbar)
50	0,40
66,4	0,75
95	0,65
117	0,63
154	0,38
174	1,20
265	0,80
311	4,00
347	9,50

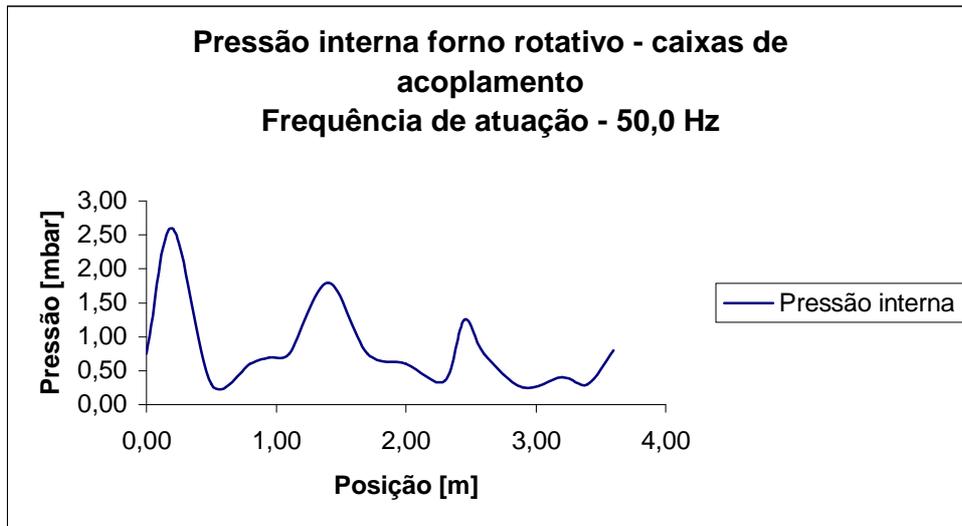


Figura 5 – Perfil de pressão para atuação de 50 Hz

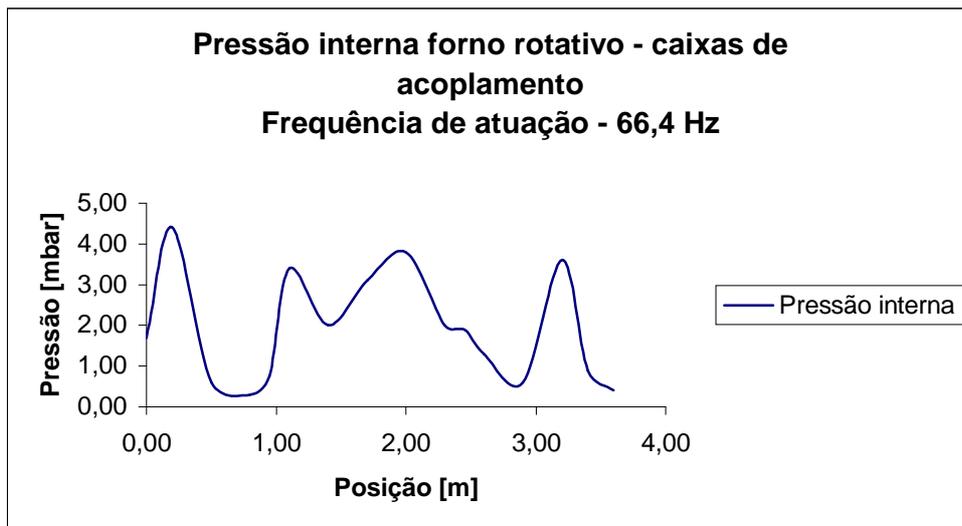


Figura 6 – Perfil de pressão para atuação de 66,4 Hz

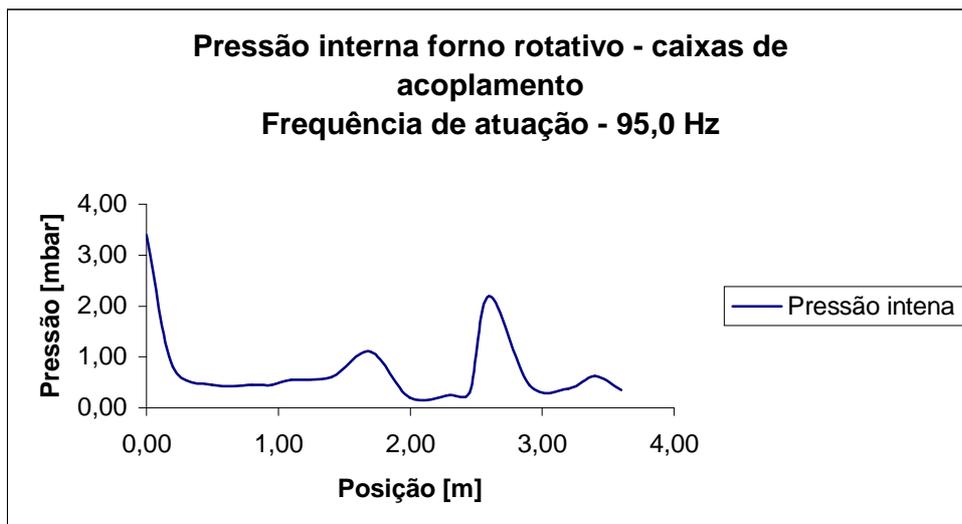


Figura 7 – Perfil de pressão para atuação de 95 Hz

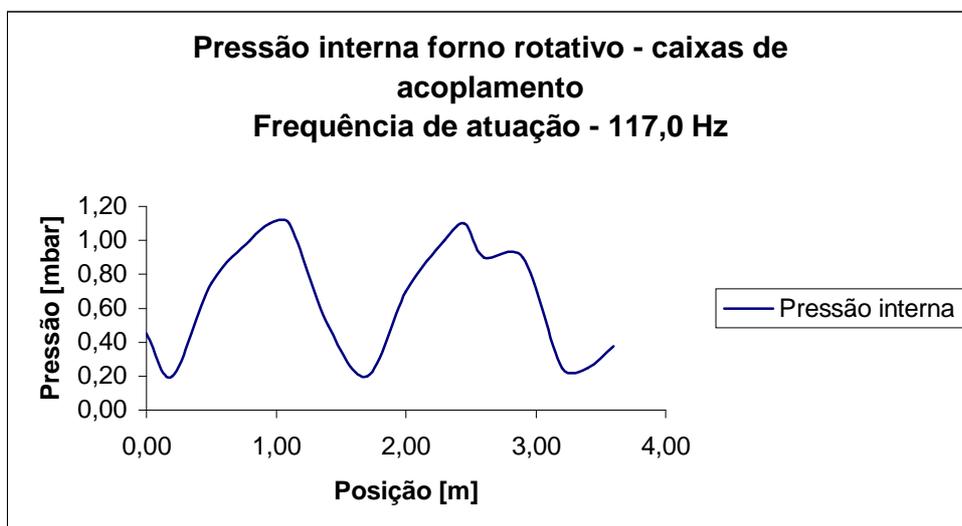


Figura 8 – Perfil de pressão para atuação de 117 Hz

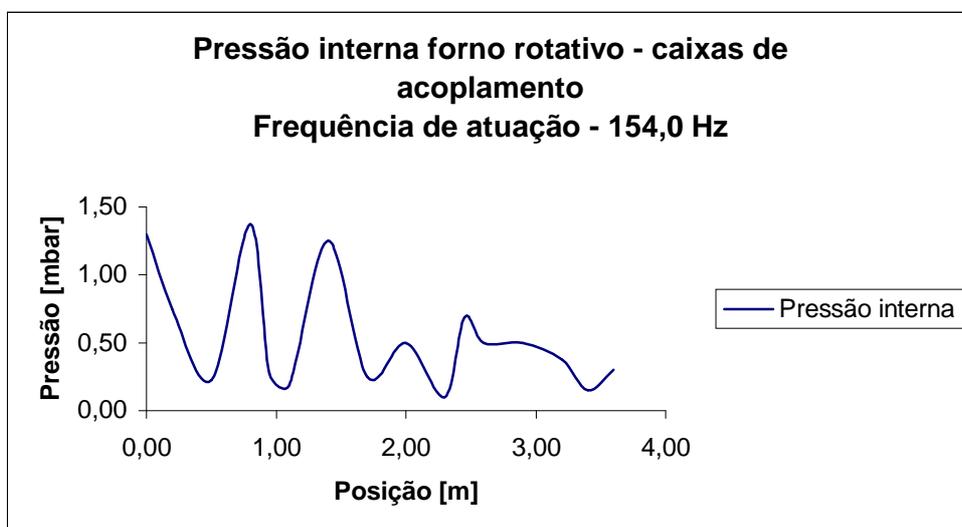


Figura 9 – Perfil de pressão para atuação de 154 Hz

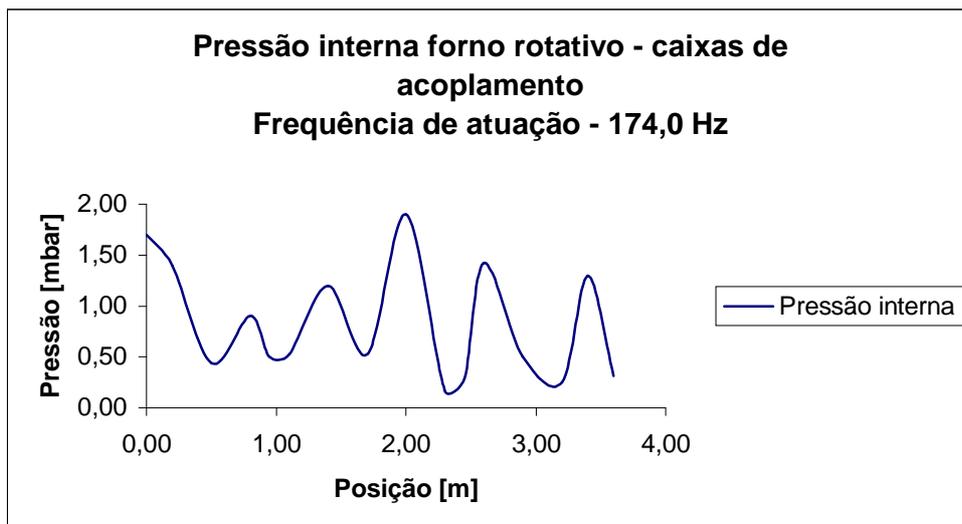


Figura 10 – Perfil de pressão para atuação de 174 Hz

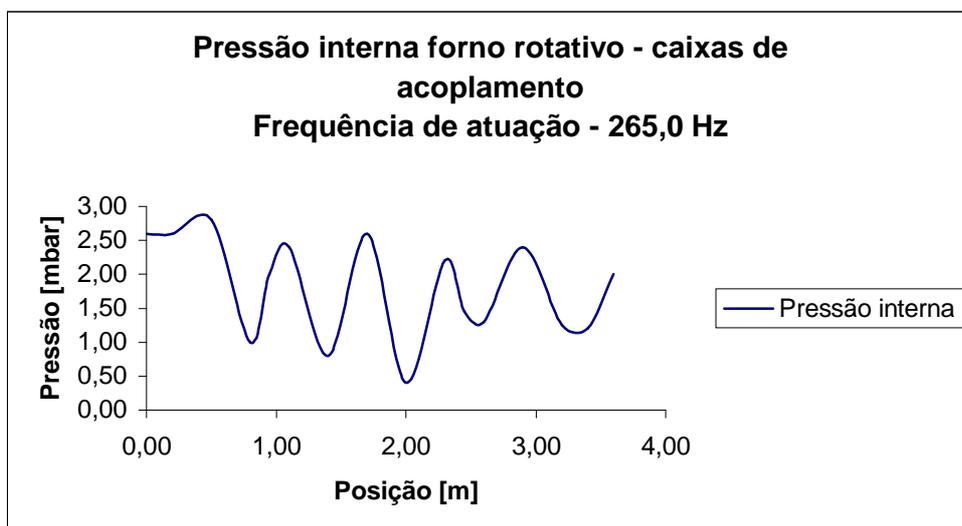


Figura 11 – Perfil de pressão para atuação de 265 Hz

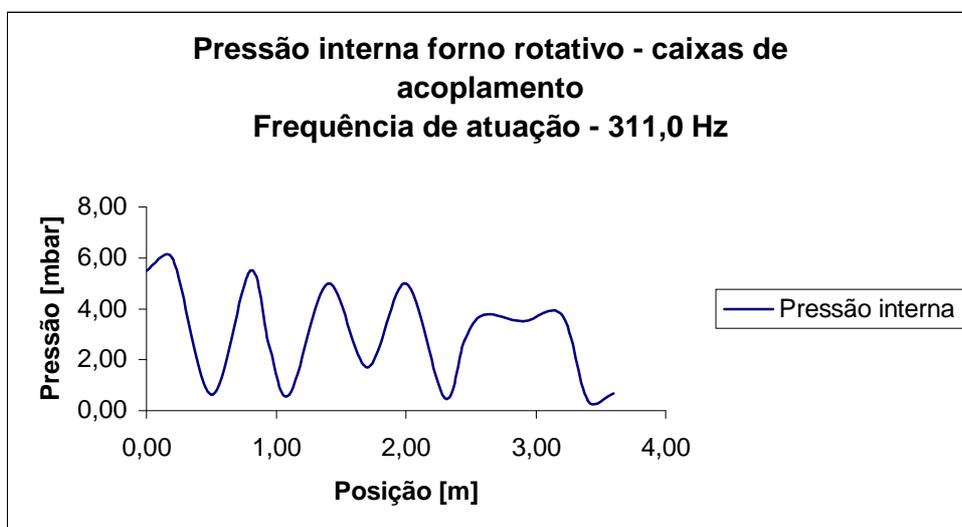


Figura 12 – Perfil de pressão para atuação de 311 Hz

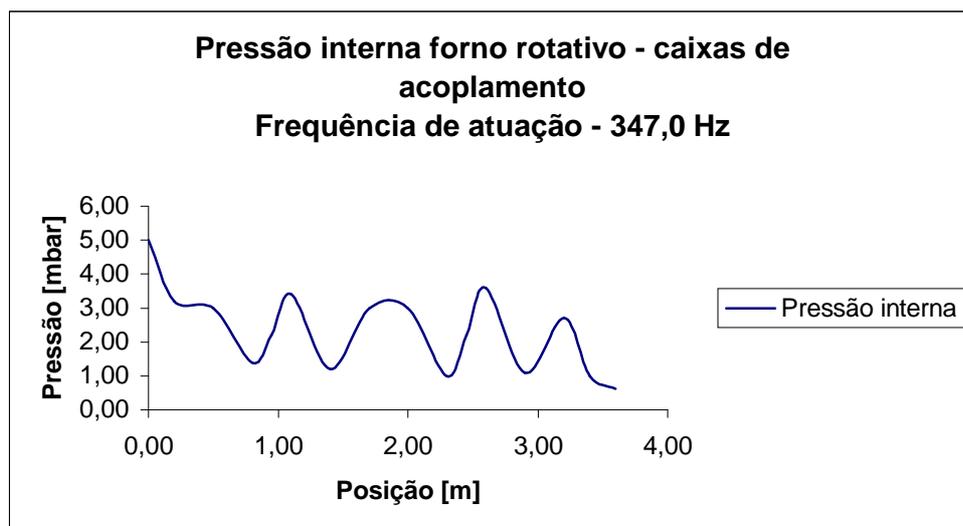


Figura 13 – Perfil de pressão para atuação de 347 Hz

Deve-se observar que as frequências da Tab. (3) foram determinadas quando as amplitudes de pressão no transdutor posicionado ao fundo do forno rotativo eram máximas para a posição do tubo interno totalmente dentro do tubo externo. Daí ajustava-se o tubo interno em uma posição de forma a aumentar ainda mais a pressão no transdutor da caixa de saída, até obter-se um segundo máximo. Nesta operação a frequência não variava. Daí então corria-se um segundo transdutor de pressão na ponta de um tubo, conforme mostrado na Fig. 4.

Os gráficos demonstram o caráter de nós e anti-nós de pressão dentro do forno rotativo, especialmente nas Fig. (9 – 13). A grande maioria dos sinais de pressão era de natureza senoidal pura. Algumas situações mostraram acoplamento de dois ou mais modos, quando o sinal de pressão era uma soma de sinais senoidais.

Máximos de amplitude de pressão em todos os testes ocorreram para a situação de 311 Hz, quando foram obtidos 6 mbar na posição 25 cm, 5 mbar na posição 75 cm e 5 mbar na posição 1,5 cm. Para 66,4 Hz obteve-se a segunda maior amplitude de pressão, 4,5 mbar a 25 cm.

Para a situação a frio, o forno rotativo nas dimensões daquele desenvolvido responde idealmente a excitações na frequência de 311 Hz. No entanto, os 6 mbar ainda estão bastante aquém de amplitudes de pressão obtidos com na situação com combustão em tubos de Rijke (Carvalho, 1983). Espera-se que, com o forno rotativo operando com o combustor sintonizável, sejam obtidas amplitudes de pressão bastante superiores às características da situação a frio. Espera-se também alguma mudança nas frequências.

8. Conclusão

O sistema como idealizado é passível de excitação acústica com controle ativo, conforme demonstram as Fig. (5 – 13). Os trabalhos prosseguirão com a colocação do queimador operando com gás em vazões da ordem de 3 a 5 % da vazão nominal de incineração do forno e obtenção dos mesmos parâmetros apresentados anteriormente. Após esta segunda série de testes, o forno então será operado com o resíduo e o queimador. Novamente os mesmos parâmetros serão levantados. Adicionalmente, serão comparadas as eficiências e capacidade de incineração com e sem a presença de oscilações acústicas.

9. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FAPESP através da bolsa de doutorado 98/16532-0 (CAB) e do projeto 99/10484-6.

10. Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas: Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos – Padrões de Desempenho, NB-1265, 1989.
- Belles, F.E.: R&D and Other Needs for Exploitation of Pulse Combustion in Space Heating Applications, Proc. of the Symposium on Pulse Combustion Technology for Heating Applications, Argonne National Laboratory, pp. 167-180, 1979.
- Bonner, T.A.; Cornett, C.L.; Desai, B.O.; Fullerkamp, J.M.; Hughes, T.W.; Johnson, M.L.; Kennedy, E.D.; McCormick, R.J.; Peters, J.A.; Zanders, D.L.: Engineering Handbook for Hazardous Waste Incineration, Monsanto Res. Corp., Dayton, OH, 1981.
- Brunner, C.R.: Handbook of Incineration Systems, McGraw-Hill Inc., 1991.

- Carvalho, J.A.Jr.: Investigation of the Characteristics of a Coal Burning Rijke Type Pulsating Combustor, Tese de Doutorado, Georgia Institute of Technology, 1983.
- Carvalho, J.A.Jr.; Gotaç, P.R.: Heat and Mass Balance Analysis of an Incinerator for Aqueous Wastes, International Comm. Heat and Mass Transfer, 20(4):535-544, 1993.
- Central de Tratamento de Efluentes Líquidos (CETREL), Dado Obtido em Visita do Solicitante da Presente Proposta à Unidade de Incineração de Camaçari, 1991.
- Comgás, Companhia de Gás de São Paulo, site da internet: <http://www.comgas.com.br>, 2002.
- Dempsey, C.R.; Oppelt, E.T.: Incineration of Hazardous Waste, A Critical Review Update, Journal of the Air and Waste Management Assoc., 43(1):25-73, 1993.
- Martins, C.A.; Carvalho, J.A.Jr.; Ferreira, M.A.; Veras, C.A.G.: An Experimental Investigation of NO_x Formation in a Rijke Type Pulse Combustor, Proc. of the Fifth Int. Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, Lisboa, Portugal, 6 pages, 1999.
- McQuay, M.Q.; Dubey, R.K.; Nazeer, W.A.: An Experimental Study on the Impact of Acoustics and Spray Quality on the Emission of CO and NO from an Ethanol Spray Flame, Fuel, 77(5): 425-435, 1998.
- Melo, G.F.; Lacava, P.T.; Carvalho, J.A.Jr.: A Case Study of Air Enrichment in Rotary Kiln Incineration, International Comm. Heat and Mass Transfer, 25(5):681-692, 1998.
- Niessen, W.R.: Combustion and Incineration Processes, Marcel Dekker Inc., 1978.
- Owens, W.D.; Silcox, G.D.; Lighty, J.S.; Deng, X.X.; Pershing, D.W.; Cundy, V.A.; Leger, C.B.; Jakway, A.L.: Thermal Analysis of Rotary Kiln Incineration: Comparison of Theory and Experiment, Combustion and Flame 86:101-114, 1991.
- R.K. Dubey; D.L. Black; M.Q. McQuay; J.A. Carvalho Jr., The effect of an acoustic field on the burning of a hydrogen-stabilized ethanol spray flame in a propane-fired Rijke-tube combustor, Combustion and Flame, 110:25-38, 1997.
- R.K. Dubey; M.Q. McQuay; J.A. Carvalho Jr., An experimental and theoretical investigation on the effects of acoustics on spray combustion, Proc. of the Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, Boulder, Colorado, 2017-2023, 1998.
- Stewart, C.R.; Lemieux, P.M.; Zinn, B.T.: Application of Pulse Combustion to Solid and Hazardous Waste Incineration, Combustion Science and Technology, 94:427-446, 1993.
- Zinn, B.T.: Pulse Combustion: Recent Applications and Research Issues, Proc. of the Twenty-Fourth International Symposium on Combustion, Invited Paper, Sydney, Australia, 1992.

DESIGN AND COLD FLOW TESTS OF A SOLID RESIDUE INCINERATOR THAT UTILIZES A PULSE COMBUSTOR WITH ACTIVE CONTROL

Cesar Augusto Botura

Unesp – Campus de Guaratinguetá – Av. Ariberto Pereira da Cunha 333 – Guaratinguetá – SP, CEP 12516-410
cesar@cptec.inpe.br

João Andrade de Carvalho Jr.

Unesp – Campus de Guaratinguetá – Av. Ariberto Pereira da Cunha 333 – Guaratinguetá – SP, CEP 12516-410
joao@feg.unesp.br

Galdenoro Botura Jr.

Unesp – Campus de Guaratinguetá – Av. Ariberto Pereira da Cunha 333 – Guaratinguetá – SP, CEP 12516-410
botura@feg.unesp.br

Marco Aurélio Ferreira

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Rodovia Presidente Dutra km 40 - Cachoeira Paulista – SP, CEP 12630-000
marco@lcp.inpe.br

Abstract. The purpose of this article is to show the steps followed in the design of a solid residue incinerator that will use the technique of pulse combustion. The system is composed of a rotary kiln and a post combustion chamber. Cold flow tests are discussed; they indicate that it is possible to excite acoustically the designed system and operate it under active control.

Keywords: *incineration, residues, pulse combustion.*