

ANÁLISE TÉRMICA DO PROCESSO DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS AQUOSOS COM CHAMAS ENRIQUECIDAS

Pedro Teixeira Lacava¹
João Andrade de Carvalho Jr²
Amilcar Porto Pimenta³
Marco Aurélio Ferreira⁴

Resumo. A utilização de oxigênio para enriquecer o comburente pode ser uma técnica atrativa para aumentar a capacidade de incineração de uma câmara de combustão projetada para operar com ar. Para uma determinada vazão de combustível, se alguns parâmetros forem fixados (temperatura de operação, nível de turbulência e tempo de residência), ao se adicionar oxigênio no ar de combustão é possível aumentar a capacidade de incineração da câmara. Desta forma, o presente trabalho apresenta uma análise térmica do enriquecimento do oxidante em uma câmara de escala laboratorial projetada para incineração de resíduos líquidos aquosos, utilizando diesel como combustível auxiliar. Os resultados experimentais indicam que a análise térmica pode ser uma importante ferramenta para previsão do aumento da capacidade de incineração da câmara.

Palavras-chave: incineração, combustão com enriquecimento do oxidante, análise térmica.

58 Congresso Anual da ABM, Julho 2003, Rio de Janeiro.

- 1 – Professor Adjunto/ Instituto Tecnológico de Aeronáutica – São José dos Campos
- 2 – Professor Titular/ Universidade Estadual Paulista – Guaratinguetá
- 3 – Professor Adjunto/ Instituto Tecnológico de Aeronáutica – São José dos Campos
- 4 – Pesquisador/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Cachoeira Paulista

1. INTRODUÇÃO

A grande maioria dos processos de combustão utilizam o ar ambiente como fonte de oxigênio. No entanto, a maior parte da energia térmica liberada é absorvida pelo nitrogênio, visto que o ar em base volumétrica é constituído de 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de traços de outros constituintes. Do ponto de vista térmico, o nitrogênio é inerte, ou seja, apenas absorve a energia liberada pelas reações de combustão, que poderia estar sendo utilizada em um processo industrial (Griffith, 1990). Desta forma, enriquecer o oxidante nada mais é que aumentar a sua porcentagem de O_2 acima dos 21% encontrados no ar atmosférico, podendo atingir os seguintes benefícios (Flamme e Kremer, 1993): aumento da produtividade, elevação da eficiência térmica, redução do volume dos gases de combustão, aumento da temperatura de operação e redução do consumo de combustível. O uso de oxigênio para enriquecer o oxidante pode ser uma alternativa atrativa para aumentar a capacidade de incineração de uma câmara projetada para operar com ar como oxidante, principalmente para resíduos de baixo poder calorífico (Sharani et al., 1996). Para uma certa vazão de combustível, se alguns parâmetros de incineração forem mantidos constantes (como temperatura da câmara, nível de turbulência e tempo de residência), o aumento da taxa de incineração torna-se possível com a injeção de oxigênio (Melo et al., 1998). Desta forma, o presente trabalho apresenta uma investigação teórica e experimental sobre o aumento da capacidade de incineração através do enriquecimento do ar, para uma câmara projetada para incineração de resíduos aquosos e que utiliza o diesel como combustível auxiliar e o ar como oxidante.

2. ANÁLISE TERMOQUÍMICA

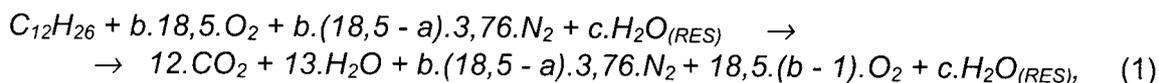
Nesta seção realizou-se uma abordagem teórica baseada nos balanços de massa e energia aplicados à situação de incineração de resíduos aquosos com combustão enriquecida. Através da análise termoquímica é possível estimar a capacidade do aumento da taxa de incineração da câmara com o enriquecimento. O combustível utilizado na análise foi o diesel (aproximado como $C_{12}H_{26}$) e o resíduo considerado como 100% água. Essa situação teórica corresponde à condição experimental investigada nas seções seguintes, permitindo a comparação.

Os balanços de massa e de energia foram aplicados ao volume de controle (VC) definido como sendo o volume de toda câmara de combustão.

Adotou-se como condição de entrada os reagentes e o resíduo estando a $25^\circ C$ e 1 atm. Como condição de saída os gases deixam o VC na temperatura T_s e a 1 atm. Também foi incluída ao balanço de energia a eficiência da refratagem da câmara, ou seja, o calor que é transferido para parede. Além disso, algumas considerações foram feitas: a) combustão completa, ou seja, não há dissociação dos produtos de combustão; b) a água formada decorrente da oxidação do hidrogênio presente no combustível está em fase gasosa; c) o resíduo é totalmente vaporizado; d) a combustão ocorre a pressão constante.

2.1. Balanco de Massa

A equação (1) apresenta a reação global de combustão com excesso normalizado de ar enriquecido e injeção de resíduo.



onde **a** é número de moles de oxigênio não proveniente do ar oxidante, se $a = 0$ o oxidante é 100% ar e se $a = 18,5$ o oxidante é 100% oxigênio; **b** é o excesso de ar genérico normalizado; **c** é o número de moles de resíduo aquoso acrescentado.

2.2. Balanço de Energia

Conforme já apontado, o processo de combustão foi considerado como sendo a pressão constante. Assim, a primeira lei da termodinâmica aplicada ao VC resulta no seguinte balanço de energia:

$$H_R = H_P + \Delta H_{RES} + Q_{parede}, \quad (2)$$

onde H_R é a entalpia dos reagentes na entrada do VC, H_P a entalpia dos produtos de combustão na saída do VC, ΔH_{RES} a energia transferida para o resíduo e Q_{parede} o calor transferido à parede da câmara. Escrevendo a equação (2) em termos de calores específicos, poder calorífico inferior do combustível e considerando que os reagentes entram na câmara a 25°C e 1 atm, temos:

$$n_{C_{12}H_{26}} \cdot PCI_{C_{12}H_{26}} = \int_{25}^{T_s} (\sum_j n_j \cdot Cp_j) \cdot dT + n_{H_2O/RES} \cdot (\int_{25}^{T_s} Cp_{H_2O/vapor} \cdot dT + h_L) + Q_{parede}, \quad (3)$$

onde $n_{C_{12}H_{26}}$ é o número de moles do combustível, PCI é o poder calorífico inferior do combustível, n_j é o número de mols para o composto j dos gases produtos de combustão ($j = CO_2, H_2O, O_2$ e N_2), $n_{H_2O/RES}$ é o número de moles da água que simula o resíduo, h_L o calor latente de vaporização da água e Cp o calor específico a pressão constante. Desta forma, a avaliação do processo de enriquecimento do ponto de vista termoquímico, consiste do acoplamento das equações (1) e (3). O PCI do $C_{12}H_{26}$ é 10259kcal/kg ou $1744 \cdot 10^3$ cal/mol e o h_L da água igual -539kcal/kg ou -9720cal/mol. Os valores de Cp foram obtidos em Perry e Chilton (1973).

2.3. Simulação

Nesta subseção são apresentados os resultados das simulações de condições de enriquecimento em uma câmara inicialmente projetada para operar com ar. Para avaliar o efeito do enriquecimento no aumento da capacidade de incineração se utilizou como indicador a taxa de incineração, definida como a razão entre a vazão mássica de resíduo (m_{res}) e a vazão mássica de combustível (m_f).

Figura 1 apresenta o resultado do comportamento da taxa de incineração de uma câmara de incineração de resíduo aquoso (água), queimando diesel ($C_{12}H_{26}$) como combustível auxiliar e com eficiência da câmara constante em 80% para os vários níveis de enriquecimento (% de O_2 no oxidante) e excesso de oxidante normalizado. Como parâmetro fixo de operação estipulou-se como temperatura na saída da câmara (T_s) 1030K (valor adotado experimentalmente, conforme descrito na seção seguinte).

Nota-se que para qualquer valor de **b** há um aumento considerável na taxa de incineração até aproximadamente 50% de O_2 no oxidante. As curvas ainda mostram que há uma maior eficiência para excessos de oxidante mais elevados. Por exemplo: para $b = 1,15$, passando de 21% para 100% de O_2 presente no oxidante, a

taxa de incineração aumento 51%. Já para $b = 2,00$ a aumento é de 172%. Ambos comportamentos estão atrelados às combinações de vazão na câmara. A Figura 2 apresenta as vazões mássicas total, do resíduo, do O_2 injetado e do ar, para a vazão de combustível de 3,11g/s (133,55 kW).

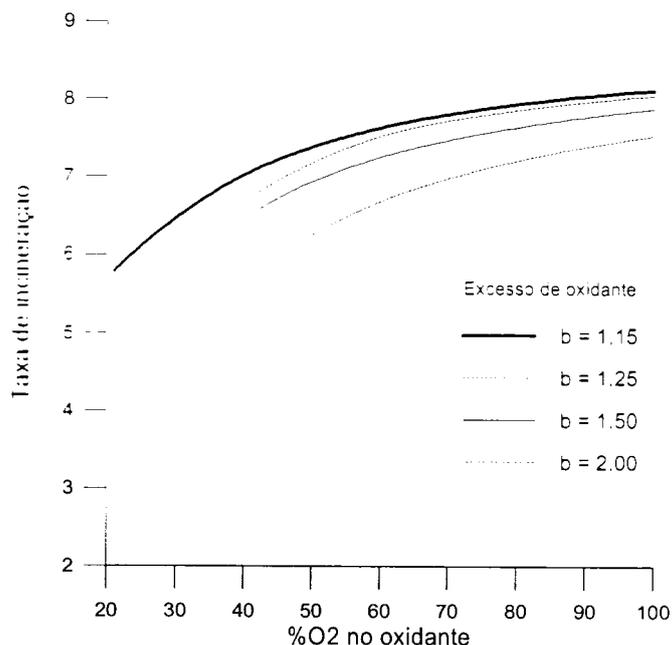


Figura 1. Comportamento da taxa de incineração em função do O_2 no oxidante para diversos valores de excesso de oxidante normalizado (eficiência da câmara é 80%).

Como mostram as curvas da Figura 2, a redução de ar na câmara com o enriquecimento é bastante acentuada até aproximadamente 50% de O_2 no oxidante. Deste ponto em diante, a redução ocorre de maneira mais branda. Como a vazão total de oxigênio (O_2 do ar + O_2 injetado) é constante para cada valor de excesso de oxidante, basicamente o responsável pelo comportamento de elevado aumento da taxa de incineração até 50% de O_2 é a acentuada redução da quantidade de nitrogênio até esse ponto.

Isso também explica o fato da diferença entre as taxas de incineração para cada valor de excesso de oxidante irem diminuindo à medida que se aumenta o teor de oxigênio no oxidante. Para elevados níveis de enriquecimento, onde a diferença entre as vazões de ar para cada valor de excesso de oxidante é pequena, o que acaba sendo mais importante no valor da taxa de incineração é o oxigênio excedente injetado na câmara.

3. ABORDAGEM EXPERIMENTAL

3.1. Descrição do Experimento

Em todos ensaios realizados, utilizou-se apenas água para simulação do resíduo, em virtude das facilidades experimentais envolvidas e pelo fato do enriquecimento do oxidante ser vantajoso para incineração de resíduos não combustíveis. Além disso, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar o balanço de energia na câmara e não a destruição térmica de compostos presentes no resíduo.

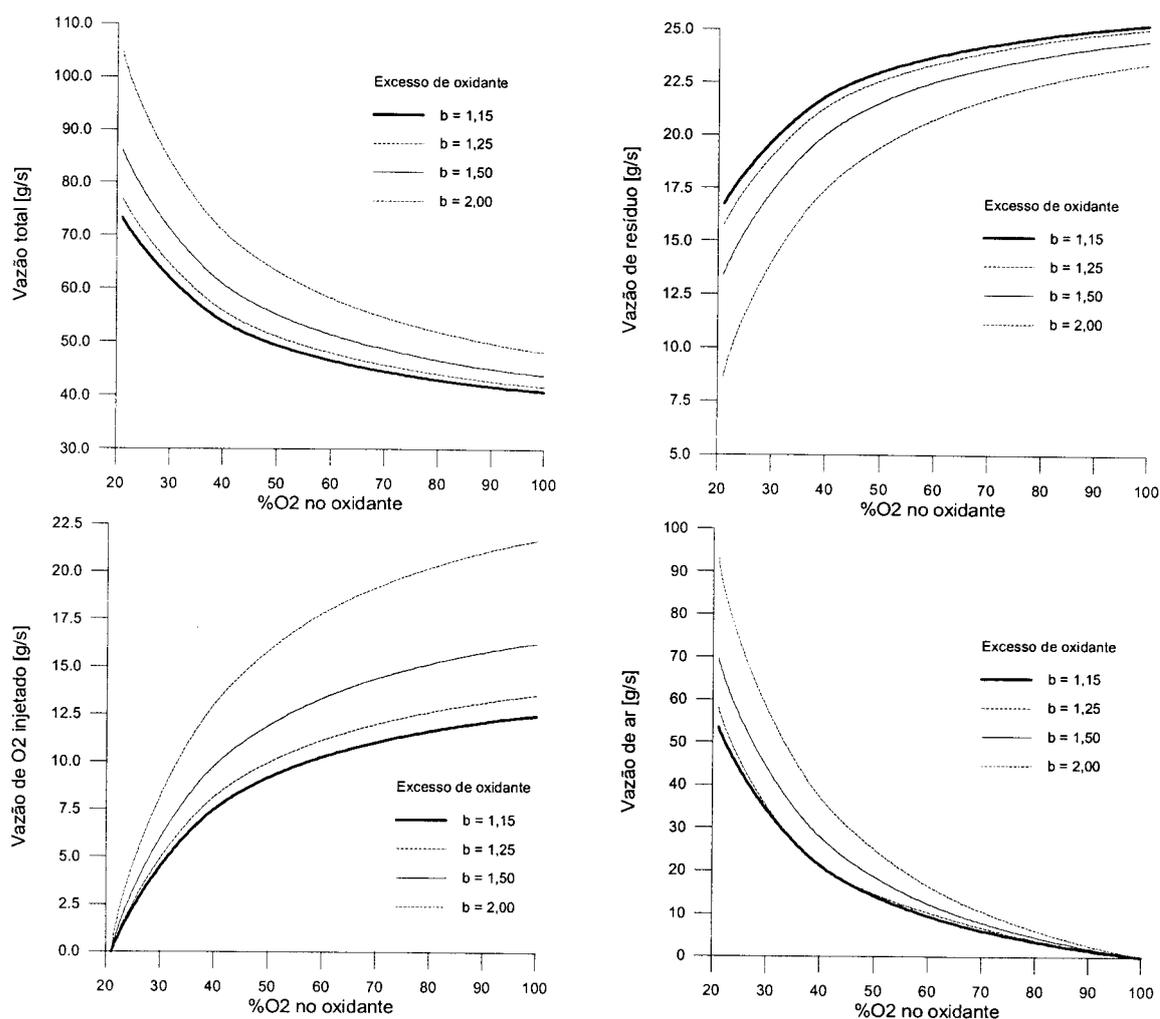


Figura 2. Vazões em função da porcentagem de O_2 no oxidante e do seu excesso (b), para a vazão de combustível de 3,11 g/s e eficiência de 80% para câmara.

Os ensaios foram realizados em uma câmara de combustão vertical, com parede refratária de 0,15 m de espessura, sem refrigeração externa e com o volume total de 1000 litros. Como combustível auxiliar utilizou-se diesel, injetado na câmara através de um queimador com dispositivo para ancorar a chama do tipo *swirler*. A Figura 3 apresenta um esquema da câmara, com o queimador posicionado em sua extremidade inferior. A injeção de resíduo é feita por um injetor tipo *Y-jet*, de tal forma que o spray formado não incida completamente sobre a chama para não apagá-la.

A instrumentação associada à câmara conta com medidas de temperatura por termopares nas posições: 0,18, 0,70, 1,05, 1,40, 1,75, 2,50, 3,00 e 4,20 m a jusante do queimador; análise dos gases de combustão (CO , CO_2 , O_2 e NO_x) através de amostragens contínuas feitas por duas sondas devidamente refrigeradas, posicionadas em dois pontos da câmara: na região próxima ao final da chama, correspondendo ao volume 227 litros, e a 30 cm da saída da câmara, correspondendo ao volume de 997 litros; medidas das vazões de diesel, resíduo, ar e oxigênio, feitas através de rotâmetros.

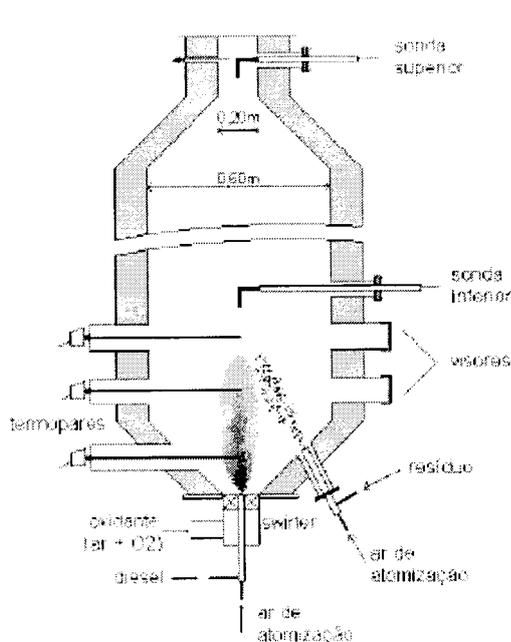


Figura 4. Esquema da câmara de combustão.

Para os ensaios, manteve-se a vazão de diesel constante em 3,11 g/s, o que representa uma potência de 133,55 kW. As vazões de ar e de oxigênio foram combinadas de tal forma que a vazão mássica do oxigênio na saída da câmara fosse 1,58 g/s. Desta forma, a queima sempre ocorreu com excesso de oxigênio em torno de 15 %. Finalmente, o aproveitamento da energia disponibilizada pela redução da presença de nitrogênio foi feito ajustando a vazão de resíduo, mas mantendo a temperatura na saída da câmara em 1030 K. A injeção de oxigênio puro foi feita na linha de ar oxidante antes da passagem do mesmo pelo queimador.

3.2. Resultados e Discussões

A Figura 4(a) apresenta o comportamento experimental da taxa de incineração, definida como a razão entre as vazões mássica de resíduo e combustível (m_{res}/m_f), em função da porcentagem de oxigênio no oxidante. Percebe-se que há um aumento considerável até aproximadamente o nível de enriquecimento de 50 % de oxigênio, cerca de 85 % acima da operação com ar. No entanto, a partir deste ponto, a taxa de incineração aumenta “lentamente” com o incremento da porcentagem de O_2 no oxidante. Para combustão com oxi-chama (100 % O_2), o aumento da taxa de incineração foi de 111% em relação à operação com ar e 13,4% em relação ao enriquecimento de 50 % de O_2 . As razões para o comportamento mais positivo para até 50% de oxigênio são as mesmas discutidas na seção anterior durante a análise termoquímica. A Figura 4(b) mostra que os comportamentos das vazões obtidas experimentalmente para a quantidade resíduo injetado, ar, oxigênio e total, seguem os mesmos padrões apresentados na abordagem teórica.

Além dos resultados experimentais, a Figura 4(a) também apresenta da taxa de incineração com enriquecimento calculado a partir do modelo termoquímico apresentado na seção 2. Contudo, para aplicação do modelo é preciso estimar a eficiência da refratagem da câmara, ou seja, a quantidade de calor transferida para parede da mesma. Na prática, em uma instalação de incineração de resíduos

líquidos aquosos, onde se deseja adaptar um sistema de enriquecimento, o único dado de transferência de calor possível de ser obtido é o da condição atual de operação da instalação, ou seja, para o oxidante sendo ar. Assim, o resultado calculado na Figura 4(a) foi obtido desta forma. A partir dos dados experimentais para operação com ar (análise de gases, vazões e temperatura na saída da câmara) utilizou-se a equação (3) para calcular a quantidade de calor transferida para parede da câmara. Com isto, encontrou-se que 39,17% da energia liberada pela combustão é perdida para parede da câmara e tal valor foi adotado constante para o cálculo da taxa de incineração com o enriquecimento. Utilizando tal procedimento, encontramos uma diferença média de 9,4% entre os resultados experimentais e os calculados (máxima de 12,59% e mínima de 6,12% para 100% e 24,98% de O_2 , respectivamente).

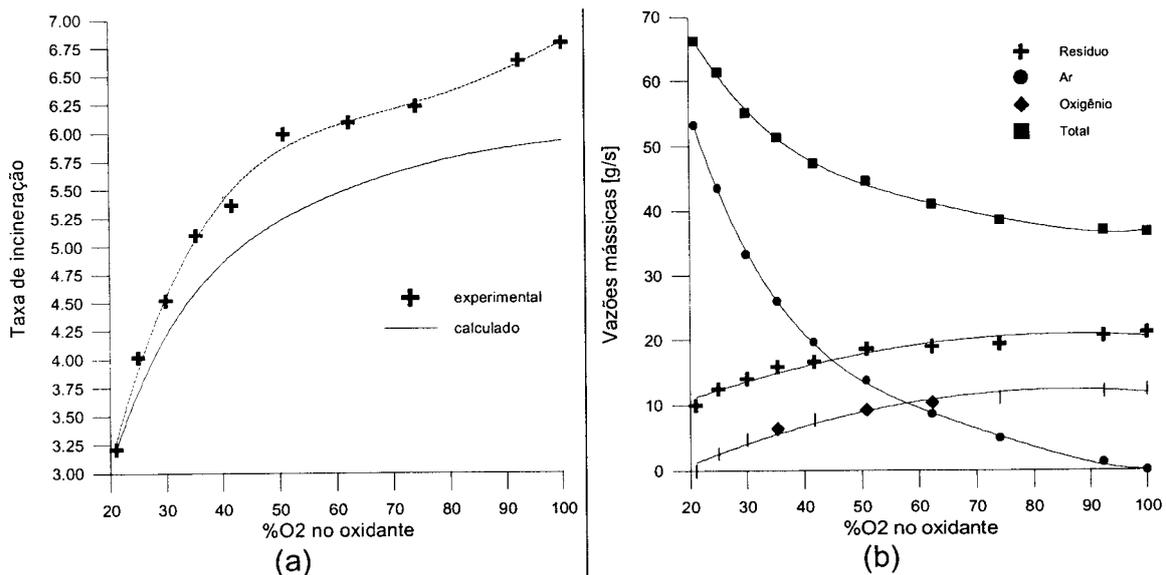


Figura 4 – (a) – Resultados experimentais e calculados sobre o comportamento da taxa de incineração em função da porcentagem de O_2 no oxidante. (b) Vazões de resíduo, ar, oxigênio e total, em função da $\%O_2$ no oxidante.

A Figura 4(a) sugere que o cálculo considerando que energia perdida para parede é constante e igual a da operação com ar, subestima a capacidade do aumento da taxa de incineração com enriquecimento. A energia liberada pelas reações de combustão em processos de incineração segue basicamente três caminhos diferentes: 1) eliminada com os gases produtos de combustão, 2) transferida para carga de resíduo e 3) transferida para as paredes da câmara. Quando a queima ocorre sobre condições enriquecidas, a energia eliminada pelos produtos de combustão diminui, pois a massa total de gases é reduzida se a temperatura for mantida constante. Sendo assim, essa energia disponibilizada seguirá os outros dois caminhos.

Para analisar esse contexto sobre os resultados experimentais, realizou-se um balanço de energia na câmara de combustão, aplicando o equacionamento apresentado na seção 2 com os resultados obtidos experimentalmente para as vazões, concentrações e temperaturas. Além disso, considerou-se combustão completa, em função das emissões de CO e NO_x serem muito baixas na saída da

câmara, quando comparadas com as do CO_2 , O_2 , N_2 e H_2O . O resultado está apresentado na Figura 5.

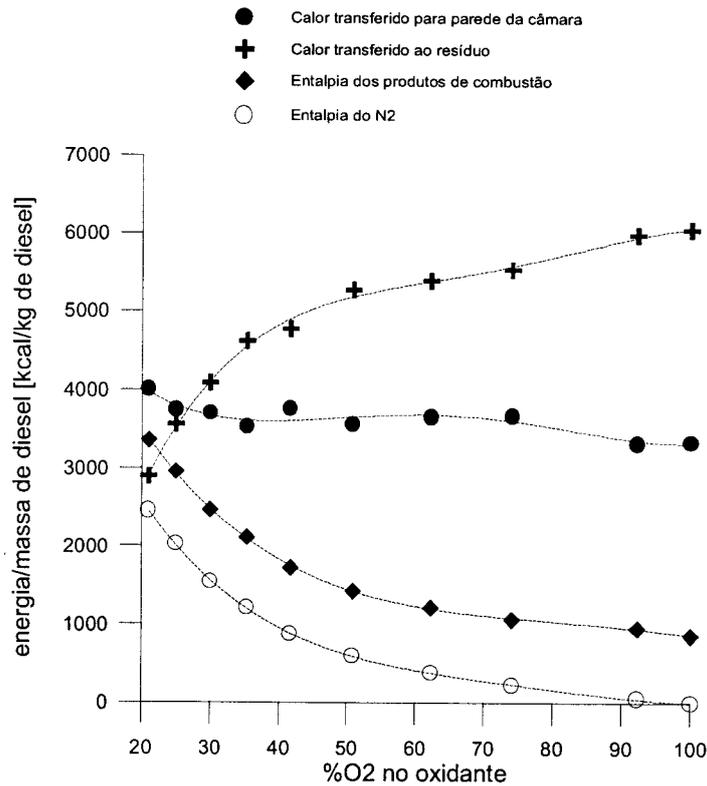


Figura 5. Resultado do balanço de energia da câmara.

O balanço de energia mostra que há uma redução na razão calor total transferido para parede da câmara/massa de combustível e que toda energia disponibilizada pela redução da massa de nitrogênio no oxidante é aproveitada para aumentar a vazão de resíduo. A quantidade de calor transferida da chama e dos gases de combustão para parede da câmara basicamente ocorre por convecção e radiação, além da influência do tempo de troca térmica.

Conforme apresentado na Figura 4(b), com aumento do enriquecimento há uma redução na massa total de gases que escoam pela câmara. Como a distribuição de temperatura altera-se muito pouco após a injeção de resíduo, de acordo com os resultados dos termopares instalados ao longo da câmara; o principal fator que acaba modificando a taxa de transferência de calor convectiva para parede da câmara, à medida que se aumenta o nível de enriquecimento, é a diminuição de velocidade em decorrência da menor vazão mássica de gases.

Para a transferência de calor por radiação, o raciocínio já não é tão simples como no caso da convecção. Diversos fatores, dos quais depende a sua intensidade, são fortemente afetados pelo processo de enriquecimento e de maneira desigual, alguns favorecendo e outros reduzindo sua taxa de transferência por radiação. Como modificações que reduzem a troca térmica por radiação pode-se citar: 1) menor presença de fuligem nos gases, 2) menor presença de compostos heteropolares (CO_2 e H_2O) na região de chama em razão da dissociação como consequência do aumento de temperatura; 3) redução do comprimento característico da chama diminuindo sua emissividade. No lado do aumento da troca

térmica por radiação tem-se: 1) aumento de temperatura na região de chama; 2) recombinação de compostos decorrentes da dissociação para formação de moléculas heteropolares (CO_2 e H_2O) na região de pós chama; 3) elevada presença de vapor d'água após a injeção de resíduo. Os dois últimos itens citados produzem pouca influência em razão de serem regiões de menor temperatura. De qualquer forma, quantificar o efeito do enriquecimento nesse processo é uma tarefa complexa; no entanto, acredita-se na média há uma redução na transferência de calor por radiação para parede da câmara.

Outro ponto importante é o tempo de residência dos gases na câmara, ou seja, o tempo de troca térmica entre os gases e a parede. Como a vazão total diminui com enriquecimento, o tempo de residência aumenta e, como consequência, a quantidade total de calor transferido também aumentará. O tempo de residência calculado para operação com ar e oxigênio puro foi de 4,2 e 6,5 segundos, respectivamente. No entanto, esse aumento no tempo de residência não compensa a redução nas taxas de transferência de calor por radiação e convecção.

4 – CONCLUSÕES

1) Os cálculos mostraram que há um considerável aumento da capacidade de incineração até 50% de O_2 no oxidante, o que foi confirmado experimentalmente. A análise teórica ainda mostrou que a eficiência do enriquecimento aumenta com o também aumento do excesso de oxidante.

2) O comportamento da taxa de incineração foi previsto teoricamente e observado experimentalmente. Contudo, quando o modelo é aplicado considerando a taxa de transferência de calor constante e igual a obtida experimentalmente para operação com ar, menores taxas de incineração são observadas em comparação com as obtidas experimentalmente, em qualquer nível de enriquecimento. A diferença média foi de 9,4%.

3) Do ponto de vista de eficiência energética, duas importantes conclusões podem ser extraídas para presente aplicação. A primeira é que toda energia disponibilizada da redução da quantidade de nitrogênio no oxidante é completamente utilizada para aumentar a capacidade de incineração. A segunda é que, já que taxa de transferência de calor através da parede reduz com enriquecimento, mais energia estará disponível para aumentar a capacidade de incineração.

5 – REFERÊNCIAS

- Flamme, M.; Kremer, H., 1993, "Reduction of the NO_x Output From Industrial Burners Firing a Mixture of Fuel Gas and Combustion Air Enriched and Oxygen", Proceedings of the Second International Conference on Combustion Technologies for a Clean Environment, Lisbon, Portugal, p.p. 1-7.
- Melo, G.F.; Lacava, P.T.; Carvalho, J.A.Jr., 1998, "A Case Study of Air Enrichment in Rotary Kiln Incineration", International Communications in Heat and Mass Transfer, 25(5):681-692.
- Griffith, C.R., 1990, "Diverse Experience Using Oxygen Systems in Waste Incineration", presented at the 4th Annual National Symposium on Incineration of Industrial Wastes, Houston, Texas
- Shahani, G.H.; Gunardson, H.H.; Easterbrook, N.C., 1996, "Consider Oxygen for Hydrocarbon Oxidations", Chemical Engineering Progress, 92(11):66-71.