

PROCESSOS DE COMBUSTÃO: DEPENDÊNCIA DA SOCIEDADE, EMISSÃO DE POLUENTES E NOVAS TECNOLOGIAS¹

Pedro Teixeira Lacava²

Resumo

Quase 80% da energia utilizada no mundo é proveniente dos processos de combustão, incluindo transporte, atividades industriais, geração de energia elétrica e uso doméstico. Apesar das formas alternativas de geração de energia, como hidráulica e nuclear, a dependência da sociedade com a energia térmica dos processos de combustão ainda acontecerá durante diversas décadas. O ponto negativo é a emissão de poluentes dos dispositivos de combustão. Nesse contexto, o presente trabalho comenta sobre a dependência da sociedade, os impactos da emissão de poluentes e as novas tecnologias que estão sendo estudadas no Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

Palavras-chave: Emissão de poluentes; Novas tecnologias de combustão.

COMBUSTION PROCESS: SOCIETY DEPENDENCE, POLLUTANTS EMISSION, AND NEW TECHNOLOGIES

Abstracts

Almost 80% of energy utilized in the world comes from the combustion process, including the transport, industrial processes, electrical energy generation, and domestic uses. In the spite of the alternative forms of energy generation, for example, hydraulic and nuclear, the society dependence of the thermal energy from combustion process will happen during several decades. The negative point is the pollutants emissions from the combustion devices. In this context, the present work comments on the society dependence, the pollutants emissions impacts, and the technologies that have been studied in Aeronautical Institute of Technology.

Key words: Pollutant emissions; New combustion technologies.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Professor Adjunto – Instituto Tecnológico de Engenharia Aeronáutica - ITA*

1 INTRODUÇÃO

Desde da época em que homem ainda habitava as cavernas ele já utilizava o fogo como fonte de energia para sua sobrevivência, quer para cozinhar, aquecer, iluminar ou até mesmo como arma de ataque ou proteção. Apesar de todo avanço tecnológico obtido pela humanidade, a combustão continua sendo uma das nossas maiores fontes primárias de energia. No entanto, hoje encontramos outras aplicações que fazem parte do nosso dia bem mais do que nos damos conta. Como exemplo, podemos citar o motor a pistão, que equipa carros, caminhões, aeronaves leves e embarcações marítimas; a turbina a gás, empregada em termelétricas e no motor a jato utilizado na aviação; os motores foguetes, responsáveis pela propulsão aeroespacial; inúmeros processos industriais (fornos, incineradores, caldeiras, etc.); além das aplicações domésticas para preparo de alimentos e aquecimento de água e ambientes.

Desta forma, a nossa sociedade está sustentada pelos processos de combustão, que possuem como contrapartida negativa as emissões de poluentes atmosféricos. Uma reversão desse quadro exigirá muitas décadas para que a matriz energética mundial reduza consideravelmente sua dependência dos processos de combustão. Dentro desse contexto, o objetivo do presente trabalho é comentar sobre a dependência da sociedade com os processos de combustão, as emissões decorrentes e as tecnologias que estão sendo estudadas no Brasil, particularmente no Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, para tentar conciliar o uso da combustão em um ambiente mais limpo.

2 DEPENDÊNCIA DA SOCIEDADE

Conforme apresentado em Borman e Ragland,^[1] já em 1860, a combustão apresentava um papel importante no cotidiano humano. Desde então, a forma de utilização da energia térmica e os tipos predominantes de combustível foram se modificando, mas a importância da combustão não. Antes da revolução industrial, a biomassa, liderada pela queima de madeira, era principal fonte de energia. Com a revolução industrial e o descobrimento acentuado das minas de carvão, a utilização desse combustível tornou-se cada vez mais crescente. No início do século vinte, devido principalmente pelo uso automotivo, os derivados do petróleo passaram a ser fundamental para economia de muitos países. Na década de quarenta, amplia-se o uso de gás natural e de outras formas de energia não dependentes da combustão, como a hidráulica e a nuclear. Contudo, pode-se dizer que cerca de 80% da energia primária hoje consumida no mundo são oriundos de processos que envolvem a energia térmica liberada pelas reações de combustão.

Evidentemente que a matriz energética de cada país apresenta uma situação particular; pois, esta depende de uma série de fatores, como: os recursos naturais disponíveis, os acordos comerciais, políticas internas de uso racional da energia, minimização de impacto ambiental e situação econômica. Assim, pode-se afirmar que a economia de diversos países desenvolvidos ou em desenvolvimento está sustentada na queima de combustíveis como fonte de energia. Um exemplo disso é quem em 1989 cerca de 89% da energia consumida nos Estados Unidos foi obtida por processos de combustão.^[2] No caso do Brasil, mesmo com ampla utilização do recurso hídricos para geração de energia elétrica, a queima de derivados do petróleo, gás natural, carvão mineral, lenha, carvão vegetal e dos resíduos agroindustriais corresponde a 80% da matriz energética nacional, segundo apontado pelo Ministério de Minas e Energia em 2004.^[3]

Apesar da ampla utilização da energia térmica liberada pelas reações de combustão, cada vez mais surgem pesquisas e desenvolvimento tecnológicos para que o uso desta fonte de energia seja o mais racional possível. Dois fatores contribuem para isso: primeiro o aumento do preço dos combustíveis fósseis desde a crise do petróleo na década de setenta; segundo as preocupações ambientais relacionadas com emissão de poluentes atmosféricos. O uso da combustão trouxe grande avanço para a humanidade; contudo, agregados a esses avanços surgiram problemas ambientais complexos, como o efeito estufa, a chuva ácida e a presença de gases altamente tóxicos na atmosfera. Dentro deste contexto, o engenheiro ou pesquisador que de alguma forma atua em uma área relacionada com o aproveitamento térmico das reações de combustão, deve ter o conhecimento básico sobre este fenômeno.

Os avanços tecnológicos dos processos de combustão não são “espontâneos”, mas decorrentes de solicitações da sociedade, normalmente respondendo à redução de custos e, mais recentemente, a degradação do meio ambiente. Assim, pensando na história recente do uso da combustão, a seguir apresenta-se a evolução do conceito de aproveitamento da energia térmica da combustão cronologicamente dividida em décadas.

- Até a década de sessenta: cumprir com as necessidades do processo.
- Década de setenta: redução do consumo de combustível em razão da crise do petróleo.
- Década de oitenta: redução das emissões (NO_x , CO, UHC, SO_2 , particulados, etc.).
- Década de noventa: redução das emissões de CO_2 , preocupação com efeito estufa e pressões do acordo de Kioto.
- Atualmente: eficiência energética (melhor aproveitamento da energia térmica com baixas emissões), mercado ininterrupto de energia, maior inserção de combustíveis de biomassa, uso de hidrogênio e preocupações com os demais gases de efeito estufa, como o metano e NO_x .

Como a sociedade já sente as conseqüências do efeito estufa, alterando a o clima por todo o planeta, a preocupação com as emissões passou a ser pauta de discussão entre os diversos setores da sociedade, desde a população leiga, bem como pesquisadores e tomadores de decisão. Um bom indicativo desse comentário são os dados apresentados pelo Boletim de Eficiência Energética da Associação Brasileira das Empresas de Conservação de Energia - ABESCO, publicado em 16 de fevereiro de 2007.^[4] Segundo esse veículo de comunicação: “....Existem alguns temas que caem no gosto da sociedade e passam a ocupar muito espaço nos cenários de comunicação. O aquecimento global é um deles. Aliás, é o tema ambiental que mais mobiliza as atenções no momento. E isto é muito bom. O termo aquecimento global retorna 798.000 hits no Google, enquanto efeito estufa tem 593.000 hits de presença na internet. Protocolo de Kioto, com “i”, tem 645.000 hits e Protocolo de Kioto, com “y” tem outros 852.000. Isto apenas em sites em português. Se a mesma busca for realizada em inglês certamente os números serão astronômicos. No Brasil, a febre atingiu os principais meios de comunicação, a ponto de o tema ser tratado em uma série de reportagens no principal informativo semanal da TV Globo, o Fantástico....”.

Evidentemente que para responder aos interesses da sociedade, a cadeia de profissionais envolvidos com o desenvolvimento de tecnologia e conhecimento, produção de equipamentos, geração e utilização de energia precisam estar mobilizados conjuntamente. Nesse aspecto, criou-se no Brasil a Rede Nacional de Combustão,^[3] que se destaca por ser uma rede de excelência de profissionais e

instituições atuando de forma cooperativa e colaborativa, em sinergia, na pesquisa, desenvolvimento e uso de processos, equipamentos e sistemas da área de combustão, com a participação de: universidades e grupos de pesquisa, empresas fabricantes de equipamentos e sistemas, empresas geradoras ou consumidoras de energia e associações do setor produtivo.

Diversas pesquisas sobre controle de emissões estão sendo realizadas e instituições espalhadas pelo Brasil, neste trabalho serão destacadas no quarto item as tecnologias que estão sendo desenvolvidas no ITA.

3 EMISSÕES DE POLUENTES

Nesse item, serão destacados de forma sucinta os principais poluentes formados em processos de combustão.

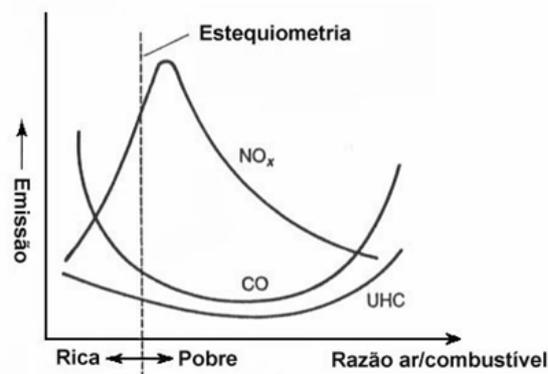
O Monóxido de Carbono (CO) resulta da situação de combustão incompleta, ou seja, da não oxidação de parte do carbono contido no combustível. Normalmente isso ocorre por consequência de umas das situações: deficiência de oxidante no processo, mistura inadequada entre o combustível e o ar, baixo tempo de residência no combustor, ou redução brusca de temperatura (ponto frio na câmara). Os efeitos da exposição serão de acordo com a concentração deles nos gases e o tempo de exposição; por exemplo, em baixa concentração, até 35 ppmv, a exposição por até oito horas é tolerável.^[5] Contudo, 200 ppmv em até três horas, causará dor de cabeça leve e desconforto; já acima de 4000 ppmv pode levar ao óbito em menos de uma hora. Desta forma, o CO é um poluente de consequências locais sendo que controle de sua emissão os projetos dos equipamentos de combustão devem apresentar alto nível de turbulência, injeção de combustível e ar adequadas, tempo de residência compatível com as vazões dos reagentes e evitar “regiões frias”.

Além do monóxido de carbono, outros poluentes decorrentes da oxidação parcial do combustível são os hidrocarbonetos não queimados (UHC - *Unburned Hydrocarbons* na língua Inglesa). Fazem parte desses poluentes, parte do combustível em fase gasosa ou na forma de gotículas, bem como produtos da degradação térmica do combustível primário em hidrocarbonetos de menor peso (ex: metano e acetileno). Além de ser uma das principais fontes de odor nos gases de combustão, juntamente com o dióxido de carbono, metano é um dos gases que mais contribuem para o efeito estufa. Para o seu controle, normalmente as mesmas medidas que são tomadas para redução do CO repercutem em baixas emissões de UHC.^[6]

Ainda na categoria de poluentes de oxidação parcial, em dispositivos onde na zona de combustão existem regiões com deficiência local de oxidante e elevada temperatura, há formação de particulados com tamanho inferior a 0,1 μm (96% de carbono e 4% como hidrogênio, oxigênio e outros constituintes), denominados por fuligem (*soot* na língua inglesa). Formação de fuligem está associada à complexas reações de craqueamento dos hidrocarbonetos (reações em fase gasosa que geram núcleos condensados sólidos) que competem com o mecanismo de oxidação do hidrocarboneto. Devido a seu reduzido tamanho as partículas de fuligem dispersão com o movimento do ar atmosférico e causam: ataque aos pulmões (problemas respiratórios); alteram os níveis de radiação solar que atingem o solo (alteram a temperatura do solo e, em razão disso, influenciam o crescimento das plantas); reduzem a visibilidade, podem conter compostos cancerígenos. Mesmo que em um determinado processo haja intensa formação de fuligem, boa parte dela pode ser consumida em regiões posteriores de combustão se houver maior penetração de

oxidante e temperatura elevada. Desta forma, recomenda-se que haja uma intensa mistura entre os reagentes durante a combustão evitar a sua formação ou ajudar sua supressão.^[7]

O termo NO_x refere-se ao total de óxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2) formado durante a combustão. Normalmente, a quantidade de NO formado é muito superior a de NO_2 ; contudo, ao ser lançado para atmosfera, o NO converte-se rapidamente a NO_2 . O total de NO_x formado durante a combustão depende: da temperatura de operação (quanto maior a temperatura maior a sua concentração), do teor de nitrogênio contido no combustível, e do excesso de oxidante (operações com ligeiro excesso de oxidante apresentam elevada formação de NO_x). Como impacto da emissão de NO_x pode-se citar: 1) chuva ácida - uma vez lançado na atmosfera entrando em contato com vapor d'água forma o ácido nítrico; 2) formação de ozônio (O_3) na Troposfera, que em exposição contínua leva a diminuição de capacidade pulmonar e destruição de tecidos orgânicos; 3) edemas pulmonares; 4) Metaemoglobina ou Cianose; 5) nas plantas, o NO_x e O_3 diminuem a permeabilidade das membranas celulares; 6) NO_x no interior das células acarreta a formação de nitrito, que possui atividade metagênica e altera as características hereditárias. Para reduzir a formação de NO_x , basicamente tem-se que controlar a temperatura da combustão e a relação entre ar e combustível. Contudo, essa não é uma tarefa simples, pois as medidas de redução de NO_x normalmente afetam inversamente as emissões de CO e UHC, como esquematizado na Figura 1 que compara as emissões de CO, UHC e NO_x em função da razão ar/combustível.



Fonte: Carvalho Jr e Lacava^[7]

Figura 1. Emissões de CO, UHC e NO_x em função da razão ar/combustível.

A oxidação do CO é sempre desejável; no entanto, não soluciona totalmente o problema da emissão de poluentes em processos de combustão. A ausência do CO em áreas urbanas é sempre desejável, devido à sua alta toxicidade. No entanto, o CO_2 na atmosfera é um dos gases que absorvem a radiação infravermelha, contribuindo para o aquecimento global, ou seja, o chamado "efeito estufa". O CO_2 e traços de outros gases permitem a penetração da radiação solar na superfície da Terra, mas reabsorvem a radiação infravermelha emitida desta. Desde a década de 50, as concentrações de gases com capacidade de absorver a radiação infravermelha aumentaram muito na atmosfera, principalmente em função das nações se tornarem mais industrializadas. Apesar disso, foram nas décadas de 80 e 90 que os índices de aquecimento global se tornaram alarmantes. Muitas incertezas ainda pairam sobre o papel de cada gás nesse processo. No entanto, já se sabe que

o CO₂ é o responsável por cerca da metade da radiação infravermelha retida na atmosfera.^[8] Infelizmente, o aproveitamento de energia da maioria dos países altamente industrializados ou não está baseado na queima de combustíveis fósseis e essa situação deve se manter por algumas décadas.

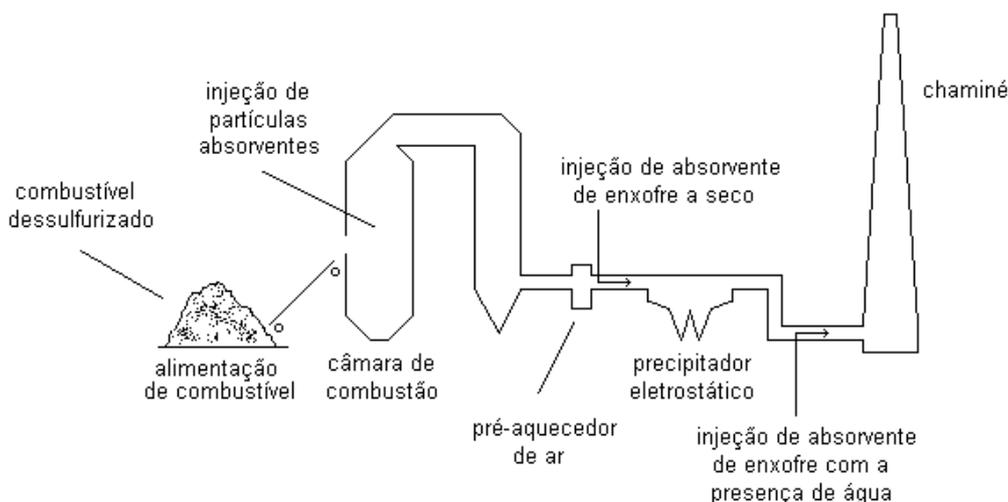
Para o caso dos combustíveis com enxofre presente na composição, praticamente todo enxofre se oxida durante a combustão formando dióxido de enxofre (SO₂). A concentração resultante do gás nos produtos de combustão é uma função da porcentagem de enxofre contida no combustível e da razão ar/combustível. As quantidades de enxofre contidas nos combustíveis fósseis mais comuns são: carvão 0,1 a 6%, óleo residual 0,75 a 3%, gasolina cerca de 0,04% e diesel cerca de 0,22%. Basicamente, 61% do SO₂ lançado para atmosfera por fontes não naturais é proveniente da queima de carvão, 25% da queima de óleo, 10% da fusão de minério de sulfeto de cobre e 1,5% da fusão de sulfeto zinco e chumbo.^[7] Uma vez lançado na atmosfera, parte do SO₂ irá sofrer oxidação através de uma variedade de mecanismos que envolvem interações em fase gasosa chamada de oxidação homogênea, cujo resultado final são as presenças dos ácidos sulfúrico (H₂SO₄) e nítrico (HNO₃), que são maiores agentes da chuva ácida. Além da chuva ácida, a presença do óxido de enxofre mesmo em baixa concentração na atmosfera pode causar sérios danos a saúde. O efeito primário à exposição ao dióxido de enxofre é sobre o sistema respiratório. Por ser altamente solúvel em água, ele é absorvido nas passagens úmidas do sistema respiratório, produzindo irritações e aumentando a resistência à aspiração, especialmente nas pessoas que já possuem alguma debilidade respiratória ou asma. Desta forma, a exposição a esse gás pode aumentar significativamente o esforço requerido para respiração, além disso estimula o surgimento de secreções da mucosa. Existe uma diversidade muito grande de dispositivos para se reduzir e controlar a emissão de SO₂. Apesar disso, esses dispositivos se encaixam nos três conceitos básicos de atuação para controle desse poluente: 1) evitar sua formação retirando o enxofre do combustível antes da queima, processo conhecido como dessulfurização do combustível; 2) a atuação no processo de combustão de tal forma que um material absorvente reduza o SO₂ formado ainda na câmara de combustão; 3) a “limpeza” dos gases após a combustão através de algum material absorvente, processo conhecido como dessulfurização dos produtos de queima. Um resumo desses processos é apresentado na Figura 2.

4 NOVAS TECNOLOGIAS

Nesta seção serão apresentadas algumas técnicas que estão sendo estudadas para controle da emissão de poluentes em processos de combustão

4.1 Combustão Pulsante

Define-se combustão pulsante processo de queima que apresenta como característica principal o fato das variáveis de estado que descrevem as condições na zona de queima ocorrerem sob condições oscilatórias, isto é, mudando periodicamente com tempo. A condição pulsada pode ser alcançada por algum dispositivo que induz oscilações ao escoamento, como, por exemplo, um alto-falante estrategicamente posicionado no queimador ou na própria câmara de combustão.

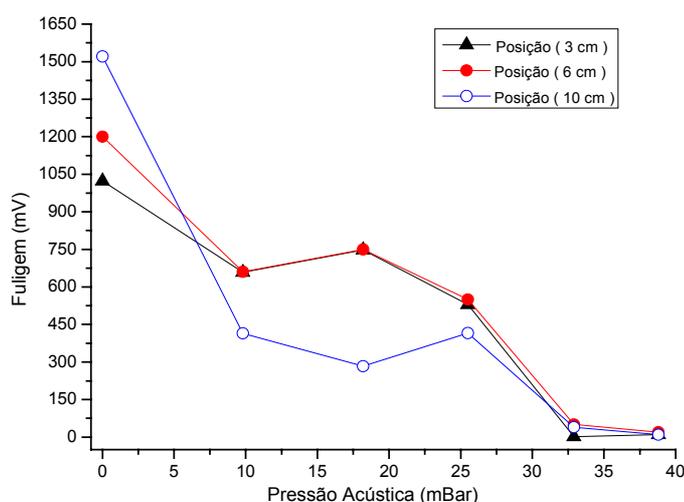


Fonte: Carvalho Jr. e Lacava [7]

Figura 2. Controle da emissão de SO₂.

A presença das oscilações aumenta a taxa de mistura entre o combustível e o oxidante, o que favorece a menor emissão dos poluentes de oxidação parcial, CO, UHC e fuligem e aumenta a eficiência de combustão, conseqüentemente, diminui o consumo de combustível. Para apresentar o potencial dessa técnica, a Figura 3 mostra o comportamento da presença da fuligem na chama em diferentes alturas e no eixo de centro de um queimador de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). A chama foi excitada por um alto-falante na frequência de 650 Hz e em diferentes amplitudes (pressão acústica). Para detectar a presença de fuligem utilizou-se a técnica de incandescência induzida por laser e o sinal observado pelo sistema é em mV. Nota-se que acima de 32,5 mbar não há mais presença de fuligem na chama.

Alguns trabalhos como o de Ferreira et al. [9] mostram que o CO também reduz com a presença do campo acústico. Já para o NO_x, o trabalho de Rocha et al. [10] indica que a redução desse poluente com a presença do campo acústico ocorre em condições específicas de frequência e amplitude.



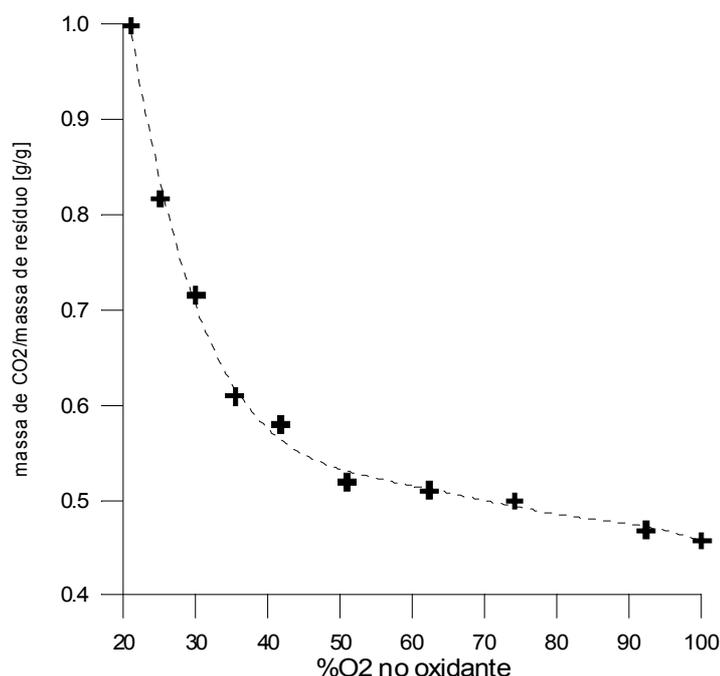
Fonte: Oliveira [11]

Figura 3. Supressão de fuligem devido à presença do campo acústico.

4.2 Combustão Enriquecida com Oxigênio

Uma maneira de se minimizar a emissão de CO_2 é através do enriquecimento do oxidante, que nada mais é do que aumentar a concentração do oxigênio acima dos 21% (base volumétrica) presentes no ar atmosférico, ou seja, reduzir a concentração de N_2 , que do ponto vista energético é inerte, apenas absorve energia que poderia estar disponível para o processo. A utilização de chamas enriquecidas pode minimizar este impacto de duas formas: 1) nas situações onde a energia disponibilizada pela menor ou não presença de nitrogênio se traduz em economia de combustível; com isso, há uma redução da vazão mássica de CO_2 descarregado para atmosfera; 2) ou no caso onde a energia disponibilizada é utilizada para aumentar a capacidade de um processo, como em incineração. Nesta última situação, mesmo a potência do processo sendo mantida constante, a massa de CO_2 emitida para atmosfera, normalizada pela massa de resíduo, diminuirá, ou seja, para incinerar uma determinada massa de resíduo uma menor quantidade de CO_2 será emitida se a incineração for realizada com oxidante enriquecido. Desta forma, a utilização da combustão enriquecida pode contribuir significativamente tanto para redução da emissão de CO como de CO_2 .

Como exemplo a Figura 4 apresenta a redução da razão entre a massa de CO_2 descarregado para atmosfera e a massa de resíduo aquoso incinerado, para diferentes porcentagens de oxigênio no oxidante. Os resultados foram obtidos em uma unidade de incineração de resíduo aquoso de escala laboratorial e que utiliza óleo diesel como combustível auxiliar.^[7]



Fonte: Carvalho Jr. e Lacava.^[7]

Figura 4. Redução da emissão normalizada de CO_2 em uma unidade de incineração de resíduo aquoso.

Apesar do resultado positivo apresentado na Figura 4, é necessário levar em conta que, com o enriquecimento há um aumento substancial da temperatura na região de chama, o que favorece a formação de NO_x . Assim, é preciso associar ao enriquecimento do oxidante algum método para controlar a emissão de NO_x . Por outro lado, as emissões de CO, hidrocarbonetos não queimados e fuligem diminuem em consideravelmente.

4.3 Combustão Assistida a Plasma

Entende-se por combustão assistida por fonte de plasma o processo de queima de um combustível, ou de vários combustíveis, que apresenta como característica principal o fato de uma parcela de combustível ser dirigida para uma região de descarga elétrica, com a presença de grande quantidade de elétrons energéticos, que colidirão com moléculas neutras, provocando a formação de radicais livres, moléculas energizadas, estados excitados e fótons.

Conforme apresentado na Figura 1 as emissões de NO_x reduzem substancialmente para combustão extremamente pobre, ou seja, com elevado excesso de ar. Por outro lado, as emissões de CO e UHC aumentam consideravelmente em razão das baixas temperaturas alcançadas. Assim, a presença de uma tocha de plasma na situação de combustão pobre pode manter os benefícios da baixa emissão de NO_x e adicionar energia ao processo ativando a conversão das espécies decorrentes de oxidação parcial. No entanto, para que essa tecnologia seja viável são necessários reatores a plasma não térmicos (RPNT), que são de baixo custo, consomem pouca energia elétrica, aproximadamente 2% do total da energia térmica liberada na combustão, e produzem altas taxas de elétrons energéticos evitando elevadas temperaturas do gás usado no plasma, ao contrário do plasma térmico. Permitem a formação de radicais livres que atuam nas reações de propagação da combustão tão bem como na decomposição dos hidrocarbonetos.

Nesse processo, parte do combustível (cerca de 50%) passa através do campo elétrico com uma quantidade mínima de ar, os gases da decomposição do combustível são injetados na câmara de combustão onde há a combustão pré-misturada do restante do combustível com o ar. A Tabela 1 mostra os resultados das emissões, onde se nota que com a presença do plasma há redução de CO pela metade mantendo baixa a emissão de NO_x, menor que 20 ppm (sensibilidade do analisador). Os resultados apresentados são para o caso da combustão extremamente pobre do gás natural.^[12]

Tabela 1. Combustão do gás natural com elevado excesso com e sem assistência de plasma.

Condição	Vazão de ar tocha [g/s]	Vazão de ar câmara [g/s]	Vazão de combustível tocha [g/s]	Vazão de combustível câmara [g/s]	%O ₂	%CO ₂	CO [ppm]	NO _x [ppm]
s/plasma	0,2	413	1,0	0,95	17,3	2,7	499	<20ppm
c/plasma	0,2	413	1,0	0,95	17,3	2,8	256	<20ppm

Fonte: Tamarozzi^[12]

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho procurou-se comentar sobre a dependência da sociedade com os processos de combustão para suas atividades de transporte, uso doméstico, geração de energia elétrica e para produção industrial, os principais poluentes gerados durante a combustão e as técnicas que estão sendo estudadas no ITA para controle desses poluentes.

Apesar da proposta de maior utilização de processos sem combustão na matriz energética mundial, como as energias hidráulica, eólica e nuclear, essa mudança, se possível, será gradativa e com elevados custos. Assim, de uma forma ou de outra, a convivência do homem com os processos de combustão ainda ocorrerá por muito tempo, o que justifica pesquisas e desenvolvimentos para o controle das emissões de poluentes.

REFERÊNCIAS

- 1 BORMAN, G. L.; RAGLAND, K. W., Combustion Engineering, Mc Graw-Hill, 1998.
- 2 TURNS, S.R., An Introduction to Combustion: Concepts and Applications, McGraw Hill, 1996.
- 3 REDE NACIONAL DE COMBUSTÃO, www.redenacionaldecombustao.org, fevereiro de 2007.
- 4 ABESCO, Boletim de Eficiência Energética da Associação Brasileira das Empresas de Conservação de Energia, Editorial: Vida Longa ao Mercado de Carbono, Ano 3 - Edição 104/03 - Sexta-Feira, 16 de Fevereiro de 2007.
- 5 AFCINTL, www.afcintl.com/cospecinst.htm, 2001.
- 6 BAHR, D.W., Control and Reduction of Aircraft Turbine Engine Exhaust Emissions, in W. Cornelius and W. G. Agnew (eds.), Emissions from Continuous Combustion Systems, 345-372, Plenum, New York, 1972.
- 7 CARVALHO JR, J.A.; LACAVA, P.T. Emissões em processos de combustão. 1.ed. São Paulo, Ed.UNESP, 2003.
- 8 MANAHAN, S. E., Fundamentals of Environmental Chemistry, Lewis Publisher, 1993.
- 9 Ferreira, D. S., Lacava, P. T., Carvalho Jr., J. A., Ferreira, M. A, Experimental Aspects of Partially Premixed Pulsating Combustion. In: 3RD International Energy Conversion Engineering Conference, 2005, San Francisco. Proceedings of 3RD INTERNATIONAL ENERGY CONVERSION ENGINEERING CONFERENCE. AIAA, 2005. v. 1
- 10 ROCHA, A. M. A., CARVALHO JR., J. A., LACAVA, P. T., Desenvolvimento de um Queimador de Gás Natural com Excitação Acústica. In: XXVI Seminário De Balanços Energéticos Globais E Utilidades, 2005, Salvador, v1, 2005.
- 11 OLIVEIRA, F.L. Aspectos Experimentais da Presença de Fuligem em Chamas Difusivas Pulsantes, dissertação de mestrado, Instituto tecnológico de aeronáutica, 2007.
- 12 Tamarozzi, L.R., Estudo das Emissões em Câmara de Combustão Assistida a Plasma, Relatório de Bolsa de Iniciação Científica -Programa PIBIC - CNPq, 2006.