

Artigo técnico

Oxi-combustão - uma alternativa para a indústria

*Oxi-combustion - an alternative for the industry*Renato Vergnhanini Filho^{a,*}

^a Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética (LBE), Unidade de Negócios: Energia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

E-mail: vergnhan@ipt.br

Palavras-chave:

oxi-combustão; oxi-combustível; combustão industrial.

Keywords:

oxy-combustion, oxy-fuel, industrial combustion.

Resumo

Denomina-se oxi-combustão ao processo que utiliza um comburente com teor de oxigênio superior aos 21 % encontrados no ar atmosférico. A prática traz uma série de benefícios, sobretudo relacionados a consumo de combustível e emissão de poluentes atmosféricos, porém implica em custos adicionais, fixos e operacionais. O Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética do IPT atua no tema desde 1991, realizando trabalhos teóricos e experimentais, muitos em parceria ou financiados pela empresa White Martins.

Abstract

Oxy-combustion is the process in which the combustion is realized using an oxidizer with oxygen content higher than 21 % found in atmospheric air. The practice brings a series of benefits, mainly related to fuel consumption and the emission of air pollutants, but it implies in additional, fixed and operational costs. The Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética of the IPT has been working on the theme since 1991, carrying out theoretical and experimental works, many in partnership or financed by the company White Martins.

1 Introdução

No uso eficiente do combustível na indústria, seja do ponto de vista energético, seja no aspecto emissão de poluentes atmosféricos, surgem frequentemente novas tecnologias. Algumas, nunca passam de "boas ideias", outras vão sendo aprimoradas e barateadas até se tornarem viáveis, entre elas está a oxi-combustão.

2 Combustão industrial

A combustão é uma reação exotérmica que ocorre entre duas substâncias, denominadas respectivamente de combustível e comburente, ocorrendo, em geral, a altas temperaturas e com ritmos intensos (JEN, 2006). A maior parte dos combustíveis empregados industrialmente é composta, basicamente, de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), enxofre (S) e inorgânicos em geral, as chamadas "cinzas" (Z). São utilizados combustíveis:

- gasosos: gás liquefeito de petróleo, gás natural, gases siderúrgicos (gás de alto-forno, gás de aciaria e gás de coqueria), gás gerado na biodigestão de compostos orgânicos (biogás), gases ácidos em geral (H_2S , NH_3), gás gerado na gaseificação da biomassa, carvão, xisto etc.;
- líquidos: derivados do petróleo (óleos combustíveis, óleo diesel), da biomassa (álcool, biodiesel, alcatrão vegetal - *biofuel*), do carvão mineral e do xisto (alcatrão mineral, óleo de xisto);
- sólidos: de origem fóssil (carvão mineral, xisto, turfa, coque), biomassas (madeira, bagaço e palha de cana, resíduos florestais etc.), carvão vegetal, resíduos urbanos (lixo, lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto).

Utiliza-se oxigênio como comburente, geralmente aquele presente na atmosfera. O Quadro 1 mostra a composição simplificada do ar atmosférico. O teor de oxigênio do agente oxidante pode ser elevado pela adição de O_2 puro, chegando ao limite da eliminação completa do N_2 . Os processos que utilizam "ar enriquecido" ou mesmo o O_2 puro como comburente são denominados de oxi-combustão (*oxy-combustion, oxy-fuel combustion*) e os queimadores, oxi-combustíveis (*oxy-fuel burners*). As formas de adição de O_2 ao processo são mostradas na Figura 1.

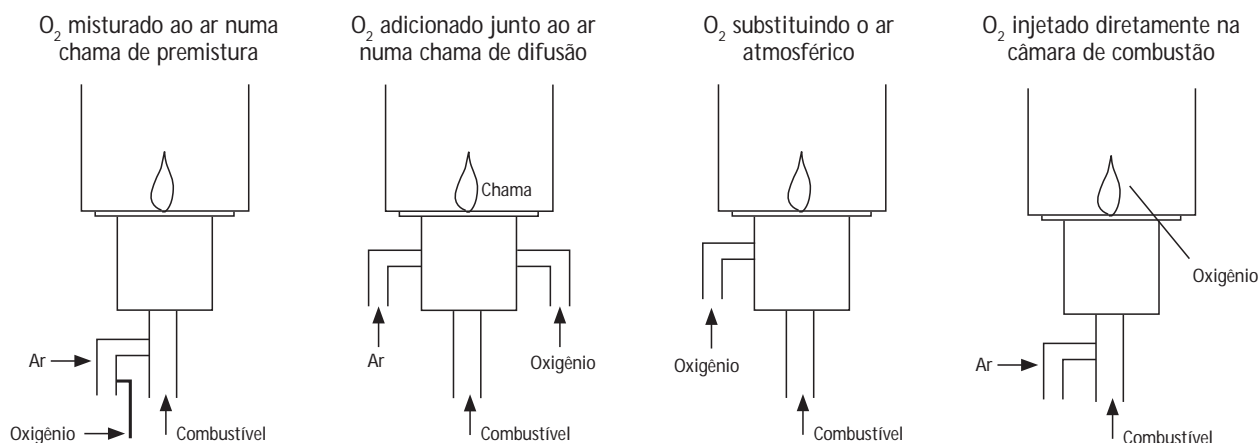
Quadro 1 - Composição do ar atmosférico

	Ar atmosférico*			
	seco		úmido*	
	volume	volume	volume	massa
Oxigênio (%)	20,9	23,2	20,6	23,0
Nitrogênio (%)	79,1	76,8	77,9	76,1

Fonte: elaborado pelo autor

* A umidade do ar depende das condições atmosféricas e pode ser determinada através de consulta à carta psicrométrica, tendo-se a pressão atmosférica e as temperaturas de bulbo seco e úmido locais; no Quadro 1 foi considerada a umidade de 0,01 kg de vapor de água por kg de ar seco, que representa o valor médio para a cidade de São Paulo.

Figura 1 - Formas de adição de oxigênio na oxi-combustão.



Fonte: Oliveira, 2012

3 Oxi-combustão

O emprego da oxi-combustão teve início nos anos cinquenta (GITMAN, 1986) e originalmente foi utilizado para se obter altas temperaturas para processo de soldagem e em propulsores de foguete. Atualmente, após muitos estudos e desenvolvimentos, e a diminuição dos custos de produção do oxigênio, em consequência do avanço das técnicas criogênicas de separação do ar, a oxi-combustão vem sendo utilizada em vários setores industriais - sobretudo nas indústrias de vidro e de materiais metálicos e não metálicos, com os benefícios apresentados a seguir.

3.1 Elevação das trocas de calor no equipamento de combustão

Na oxi-combustão, as maiores pressões parciais do oxigênio e do combustível (o nitrogênio age como diluente no processo de combustão) elevam as taxas de reação que, por sua vez, levam ao aumento significativo na temperatura da chama. Essa elevação da temperatura pode ser avaliada pelo aumento da temperatura de chama adiabática (Quadro 2).

Quadro 2 - Temperatura de chama adiabática

TEMPERATURA DE CHAMA ADIABÁTICA

A temperatura de chama adiabática (TCA) é aquela que seria atingida numa condição hipotética em que a combustão ocorresse num sistema termicamente isolado, onde toda a energia química do combustível fosse utilizada no aquecimento dos produtos de combustão.

Na realidade, as temperaturas efetivas da chama são inferiores à adiabática (que é um limite virtual), pois, a partir do momento em que a chama se estabelece, inicia-se um processo de troca de calor da chama com o meio onde ela se propaga, fazendo com que apenas parte do calor liberado seja utilizada no aquecimento dos produtos de combustão.

A TCA é calculada assumindo-se, então, que todo o calor gerado é transformado em entalpia dos produtos de combustão e será tanto maior quanto maiores forem o teor de O₂ do comburente e as temperaturas do combustível e do comburente, e menor for o excesso de ar de combustão.

Fonte: IPT, 2008

Na queima estequiométrica de metano com ar, por exemplo, a substituição do oxidante por oxigênio, mantido todos os demais parâmetros da combustão, eleva a temperatura de chama adiabática de 1950 para 2780 °C (BAUKAL, 2004), que é da ordem de grandeza do acréscimo esperado na temperatura real da chama.

O aumento da temperatura eleva as trocas de calor da chama com o seu invólucro (circuito água - vapor, no caso de uma caldeira), pois elas se dão basicamente por radiação, que é proporcional à quarta potência da temperatura (Lei de Stefan-Boltzmann).

Contribui, também, para o aumento das trocas, o aumento da emissividade dos gases na câmara de combustão - tipicamente, sobe de 0,18 para 0,34 (QI; SHAN; LI; BALETA, 2020), devido às maiores concentrações de CO₂ e H₂O dos gases. Também é um fator favorável, o maior tempo de residência dos gases nas regiões de troca de calor, devido à redução do volume de gases - fato que será comentado adiante.

3.2 Redução do consumo de combustível

Como consequência da elevação das trocas de calor, para a mesma necessidade energética, é preciso menos combustível ou, para o mesmo consumo de combustível, tem-se o aumento na potência útil e no rendimento térmico do processo, dado pela divisão da potência útil pela potência fornecida (VERGNHANINI, 2018). O aumento da eficiência energética se dá, também, pela redução da perda de energia pelos gases de combustão, ocasionada por sua redução de volume e pela menor formação de produtos da combustão incompleta do combustível - fatos que serão comentados adiante.

3.3 Melhora da ignição e da estabilidade da chama

O "enriquecimento" do ar de combustão facilita a ignição - o que é importante para combustíveis "pesados", tais como biomassas, carvões e óleos ultraviscosos, seja por reduzir a temperatura de autoignição (Quadro 3) - para o GN, por exemplo, de 630 a 750 oC para 555 a 700 oC (JENKIN, 1962), seja por aumentar a faixa de inflamabilidade (Quadro 4) da mistura. Na queima de metano com ar, por exemplo, a substituição do comburente por oxigênio pouco altera o limite inferior de inflamabilidade - passa de 5,0 para 5,1 %, porém o superior vai de 15,0 para 61,0 % (REED, 1986; COWARD AND JONES, 1952).

Como consequência do aumento de temperatura, comentado anteriormente, a velocidade da chama tende a aumentar substancialmente, tornado-a mais estável, curta e intensa. Na queima do metano, a substituição do ar por oxigênio aumenta a velocidade da chama em cerca de dez vezes (REED, 1986).

Quadro 3 - Temperatura de autoignição

TEMPERATURA DE AUTOIGNIÇÃO

A temperatura de autoignição é aquela a partir da qual uma mistura combustível - comburente, em proporções inflamáveis, entra em ignição sem a presença de chama ou faísca.

Fonte: Costa, 2008

Quadro 4 - Limites de flamabilidade

LIMITES DE FLAMABILIDADE

Existem dois valores do teor de combustível na mistura combustível-comburente que representam as concentrações limites para a propagação da chama. Esses valores extremos são chamados de limites de flamabilidade, ou limites de inflamabilidade, ou campos de flamabilidade, ou limites de explosividade, do combustível.

O limite inferior de flamabilidade caracteriza o mínimo teor de combustível na mistura para que ocorra a propagação da chama. A condição é dita super-estequiométrica ou combustão pobre ("lean combustion"). O limite superior de flamabilidade caracteriza o máximo teor de combustível na mistura em que ainda ocorre a propagação da chama. A condição é dita sub-estequiométrica ou combustão rica ("rich combustion").

Os limites de flamabilidade do combustível dependem da natureza do combustível e do comburente, do estado da mistura reagente (pressão e temperatura), além das condições de contorno e do escoamento. A presença de inertes também altera os limites.

Fonte: IPT, 2008

3.4 Redução das dimensões do equipamento de combustão e periféricos

A substituição do ar por oxigênio reduz substancialmente o volume de gases de combustão - no emprego do ar, cada volume de O_2 admitido no processo de combustão está acompanhado de 3,76 volumes de N_2 (Quadro 1). Por exemplo, utilizando o aplicativo "AComb" (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1995), verifica-se que, na queima estequiométrica de gás natural, são gerados 17,0 kg de gases de combustão por kg de GN, enquanto que, empregando-se O_2 puro, a geração de gases é de 4,7 kg por kg de GN. Na prática, emprega-se sempre uma

quantidade de comburente ligeiramente acima da estequiométrica e quando se utiliza O_2 puro é possível, geralmente, aproximar mais ainda essa quantidade da estequiométrica, ou seja, a diferença entre as vazões de gases tende a ser maior do que a apontada.

A redução do volume de gases possibilita o emprego de equipamentos de menor porte, desde o de combustão propriamente (forno, caldeira) até periféricos como equipamentos de limpeza de gases, ventiladores de exaustão e chaminés.

3.5 Redução da formação dos produtos da combustão incompleta do combustível

A formação de produtos da combustão incompleta - monóxido de carbono, material particulado orgânico e hidrocarbonetos voláteis, tende a diminuir como consequência das melhorias obtidas no processo de combustão, mencionadas anteriormente (VERGNHANINI, 1986 a).

3.6 Redução da formação do "NO_x térmico"

Na substituição do ar pelo oxigênio puro, a formação do "NO_x térmico" é eliminada devido à ausência do nitrogênio do ar. Já a formação do "NO_x combustível" tende a aumentar pelo acréscimo da pressão parcial do O_2 na zona de reação (Quadro 5). Dessa forma, a queima de combustíveis que não possuem nitrogênio quimicamente ligado (GN, GLP) a substituição leva à redução nas emissões de NO_x , porém, naqueles que o possuem, como carvão mineral e óleo combustível, a redução da formação do "NO_x térmico" poderá ser compensada pelo aumento da formação do "NO_x combustível".

3.7 Redução do custo / viabilização de técnicas de limpeza dos gases de combustão.

Na oxi-combustão, além do volume de gases de combustão ser menor, conforme já comentado, os seus constituintes poluentes (NO_x , SO_x , CO, material particulado) estão mais concentrados, simplificando / viabilizando a aplicação de técnicas de limpeza dos gases.

Esse benefício é particularmente importante quando se está preocupado com a emissão do CO_2 , que é um dos gases responsáveis pelo efeito estufa. Por exemplo, na queima estequiométrica de GN, a concentração de CO_2 dos gases aumenta de cerca de 12,0 %, em volume e em base seca, para mais de 99 % com a substituição do comburente (foi utilizado nos cálculos o aplicativo "AComb"), tornando atraente várias tecnologias de redução dessas emissões.

Quadro 5 - Óxidos de nitrogênio

ÓXIDOS DE NITROGÊNIO

Os óxidos de nitrogênio (NO e NO₂ - NO_x) são conhecidos poluentes atmosféricos (poluente primário e um dos responsáveis pela acidez das chuvas, redução da camada de ozônio e formação de oxidantes fotoquímicos - smog), sendo suas emissões por processos industriais de combustão (caldeiras, fornos, incineradores) regulamentadas no Brasil por legislações nacionais e estaduais.

A formação do NO_x na combustão é devida a reações envolvendo, basicamente, oxigênio e nitrogênio do ar (formação do "NO_x térmico") ou oxigênio e nitrogênio do combustível (formação do "NO_x combustível") e pode ser reduzida atuando-se diretamente no processo, fazendo alterações operacionais (excesso de ar, potência dissipada, recirculação de gases de combustão) ou modificações substanciais, como estagiamento no fornecimento de ar ou combustível.

Fonte: Vergnhanini (1986b).

A Petrobras, por exemplo, vem estudando o emprego da oxi-combustão nas suas unidades de craqueamento catalítico fluido (FCC) com o objetivo de serem gerados gases com alta concentração de CO₂, facilitando a sua captura para venda a indústrias compradoras desse gás, injeção em poços para retirada do petróleo, ou injeção em reservatórios naturais no subsolo nos quais fica retido - "armazenamento geológico" (IBP, 2020).

4 Atuação do IPT

A oxidação vem sendo objeto de estudo e prestação de serviços do LBE desde 1991, quando foram desenvolvidos procedimentos operacionais de queimadores oxí-óleo fabricados pela empresa White Martins (WM), utilizando-se a fornalha cilíndrica de testes (Figura 2) e demais instalações do Laboratório.

No trabalho seguinte, apresentado num encontro nacional de ciências térmicas (SOUSA; MESSIAS; VERGNHANINI FILHO; KOBAYASHI, 1994), estudou-se as influências de parâmetros construtivos e operacionais de queimadores oxí-combustíveis nas taxas de formação de óxidos de nitrogênio. A esses trabalhos, seguiram-se muitos outros, financiados, em sua maioria, pela WM, com quem o IPT em 2011 firmou um termo de cooperação técnica para o desenvolvimento de tecnologias na área de combustão (o contrato firmado entre IPT e WM teve seu prazo encerrado recentemente e sua prorrogação está atualmente sendo discutida).

Figura 2 - Fornalha cilíndrica horizontal de testes do Laboratório.



Fonte: Acervo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

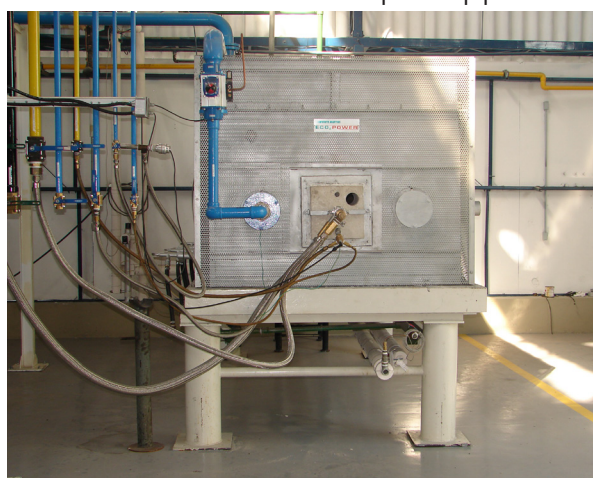
Como decorrência da parceria com a WM, as instalações do Laboratório foram aprimoradas para a realização de trabalhos envolvendo queimadores oxi-combustível. Às instalações já existentes foram incorporados, entre outros: um tanque criogênico de oxigênio de capacidade de 13.700 kg, acoplado a um sistema de vaporização; um conjunto de analisadores contínuos de gases; uma fornalha de testes horizontal de formato paralelepípedo, dotada de chaminé para a exaustão dos gases; um painel de controle das fornalhas, constituído de linhas de oxigênio e gás combustível, dotadas de válvulas, filtros, instrumentos etc., acoplado a um sistema de monitoramento e aquisição de dados (Figura 3).

Figura 3 - Instalações do Laboratório.

Tanque criogênico de oxigênio e vaporizador



Fornalha de testes de formato paralelepípedo



Analisadores contínuos de gases



Painel de controle das fornalhas



Fonte: Acervo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Os trabalhos envolvendo oxi-combustão realizados pelo LBE exigiram, muitas vezes, a realização de montagens e medições, geralmente no galpão de ensaios do Laboratório, outras na própria indústria, junto ao seu equipamento de combustão. Como exemplo, um trabalho realizado em parceria com a empresa "ATS Aerothermal Solutions and Software Distributor" e tendo a Ultragas como Cliente, que envolveu o emprego da oxi-combustão em fornos de fusão de chumbo da empresa "Tamarana Tecnologia e Soluções Ambientais", exigiu a realização de testes tanto no IPT como nas dependências da Tamarana (IPT, 2013 a 2015) (Figura 4).

Figura 4 - Emprego da oxi-combustão em fornos de fusão de chumbo.



Fonte: Acervo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

5 Conclusões

A oxi-combustão traz uma série de benefícios para a indústria, como a redução do consumo de combustível e da emissão de poluentes atmosféricos, entre outros, porém a sua implantação deve ser avaliada caso a caso, pois implica em custos fixos, de compra e modificação de equipamentos e periféricos, e operacionais, de aquisição do oxigênio - alternativamente à compra, caso o consumo seja elevado, pode-se instalar na empresa uma unidade de produção de oxigênio.

6 Referências

KOBAYASHI, H.; TSIAVA, R. *Oxy-fuel burners*. In: BAUKAL JR., C. E. *Industrial burners handbook* : CRC Press, 2004. Chap. 21

COWARD, H.F. ;JONES, G.W. *Limits of flammability of gases and vapours*., U. S. Bureau of Mines, 1952. (Bulletin 503).

COSTA, F. C. *Perspectivas da incineração de resíduos de serviços de saúde com o uso de atmosferas ricas em oxigênio*.2007.114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2007.

GITMAN, G. PYRETRON. *Variable gas/oxygen/air combustion system*. In: of INDUSTRIAL COMBUSTION TECHNOLOGY SYMPOSIUM, II., Chicago. Proceedings [...]. 1986. p. 171-178.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCMBUSTÍVEIS (IBP). *Os desafios tecnológicos da captura de CO₂: captura de CO2 de unidades de craqueamento catalítico fluidizado (FCC) em refinarias*. [S.l.]: IBP, 27 out. 2020. Fórum Online de CO2 [Webinar]. Disponível em: <http://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2020/11/gustavo-moure-webinar-2-forum-de-co2.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. *AComb - análise de combustíveis industriais*. Aplicativo de autoria de Clayton Dimas Ribeiro Fernandes com registro no INPI em 14.06.1995 sob no 01127, em nome do IPT.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. *Relatório Técnico No 99339-205*. São Paulo: IPT, 2008.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. *Relatórios Técnicos No 131134-205, 136479-205, 139635-205, 145209-205*. São Paulo: IPT, 2013- 2015.

JEN, L. C. Estequiometria das reações de combustão. São Paulo: IPT, 1986, 21 p. (Apostila do Curso Combustão Industrial).

JENKIN, D. B. The properties of liquefied petroleum gases. London, England: Shell, 1962, 73 p.

OLIVEIRA, F. A. Uso da oxi-combustão em equipamentos convencionais como alternativa a queima com ar. 2012. 136f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012,

REED, R. J. North american combustion handbook. 3rd ed. Cleveland : North American Mfg., 1986. 457 p.

SOUSA, F. D. A.; MESSIAS, L. S.; VERGNHANINI FILHO, R.; KOBAYASHI, W. T. Emissão de óxidos de nitrogênio em chamas oxi-combustíveis. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, 5.; SIMPÓSIO DE ENGENHARIA TÉRMICA, 2., 1994, São Paulo. Anais [...] Rio de Janeiro: ABCM, 1994.

VERGNHANINI FILHO, R. (a). Formação de poluentes em processos industriais de combustão: material particulado. São Paulo: IPT, 1986, 28 p. (Apostila do Curso Combustão Industrial).

VERGNHANINI FILHO, R. (b) Formação de poluentes em processos industriais de combustão: óxidos de nitrogênio. São Paulo: IPT, 1986, 28 p. (Apostila do Curso Combustão Industrial).

VERGNHANINI FILHO, R. Metodologia simplificada de cálculo do rendimento térmico de caldeiras. Revista IPT | Tecnologia e Inovação. São Paulo, v. 2, n. 7, abr., 2018.

QI, F.; SHAN, J.; LI, B.; BALETA, J. Numerical study on ladle baking process of oxy-fuel combustion. Thermal Science, v. 24, n., 6A, 2020, p. 3511 - 3520.

10.34033/2526-5830-v5n17-4

