

## Enriquecimento com Oxigênio no Comburente dos Fornos Regeneradores de Altos Fornos - *Stove Oxygen Enrichment (SOE)*

Enderson Gomes<sup>1</sup>

Pedro Zagury<sup>2</sup>

Pablo Gama<sup>3</sup>

Tiago Costa<sup>4</sup>

João Paulo<sup>5</sup>

Vitor Zanotelli<sup>6</sup>

### Resumo

A PRAXAIR é uma das três maiores empresas de gases industriais do mundo, com atuação em mais de 40 países e fortemente atuante na indústria siderúrgica. A PRAXAIR possui experiência para fornecer produtos e serviços para todos os tipos de siderúrgica. No Brasil, a PRAXAIR é a controladora da White Martins, maior empresa de gases industriais da América do Sul, presente em nove países do continente. O presente trabalho tem por objetivo mostrar os benefícios do **Stove Oxygen Enrichment (SOE)**, ou seja, o enriquecimento do ar de combustão (comburente) dos fornos regeneradores de altos fornos, visando atingir economias de combustível. O enriquecimento do comburente permite que combustíveis de menor poder calorífico sejam utilizados em substituição de combustíveis de maior poder calorífico, tornando-se disponíveis para aplicações mais nobres dentro da siderúrgica, como a laminação e a geração de energia elétrica. Outro aspecto importante é a redução da queima de combustíveis que antes eram descartados no *flare*, reduzindo as emissões de carbono para a atmosfera.

**Palavras-chave:** Oxigênio; Combustão; Regeneradores; Poder Calorífico.

### Stove Oxygen Enrichment

PRAXAIR is one of the largest industrial gases producers of the World, being present in more than 40 countries and strongly connected to the steel industry. PRAXAIR has experience to supply products and services to all kinds of steel mills. In Brazil, PRAXAIR is the owner of White Martins, the largest industrial gases company in South America, present in nine countries of the continent. The present work has the objective to show the benefits the **Stove Oxygen Enrichment (SOE)**, the enrichment of the combustion air of the blast furnace stoves with the object to achieve fuel savings. The combustion air enrichment allows the usage of lower heating value fuels substituting higher heating value fuels that will be available for more important applications inside the steel mill, such as Rolling and Power generation. Another important issue is the reduction of the amount of blast furnace gas burned in the flare, reducing carbon emissions to the atmosphere.

**Keywords:** oxygen, fuel savings,

<sup>1</sup> Engenheiro Metalúrgico, Gerente de Aplicações e Processos, Clientes On Site, White Martins Gases Industriais Ltda, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalúrgico, Gerente de Tecnologias e Aplicações, Clientes On Site, White Martins Gases Industriais Ltda, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>3</sup> Técnico e Engenheiro Mecânico, Gerente de Aplicações e Processos, Clientes On Site, White Martins Gases Industriais Ltda, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>4</sup> Técnico e Engenheiro Mecânico, Engenheiro de Aplicações e Processos, Clientes On Site, White Martins Gases Industriais Ltda, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro Químico e Mestre em Engenharia Térmica, Gerente de Aplicações e Processos, Clientes On Site, White Martins Gases Industriais Ltda, São Paulo, SP, Brasil.

- <sup>6</sup> *Engenheiro Químico, Gerente de Aplicações e Processos, Clientes On Site, White Martins Gases Industriais Ltda, Rio Grande do Sul, RS, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

A tecnologia SOE (*Stove Oxygen Enrichment*) consiste na dissolução de oxigênio na corrente do ar de combustão utilizando um *sparger* para enriquecer o comburente. Essa prática permite que seja mantida a transferência de calor nos fornos regeneradores, assim como a temperatura de chama a partir da utilização de um combustível com menor poder calorífico. Para bons resultados, é necessária uma avaliação adequada dos regeneradores a partir de modelagem e simulação, garantindo um bom dimensionamento de equipamentos, especificação adequada dos sistemas de controle e avaliação dos benefícios.

O objetivo do presente trabalho é apresentar e discutir os benefícios referentes à utilização da tecnologia SOE, que consiste no enriquecimento com oxigênio do ar de combustão dos fornos regeneradores de altos fornos. Essa prática permite a substituição de combustíveis mais nobres (com maior poder calorífico), como o Gás Natural (GN) e o Gás de Coqueria (GCO), por combustíveis menos nobres (com menor poder calorífico) como o Gás de Alto Forno (GAF).

Quando existe GAF disponível, ou seja, que possa estar sendo descartado através de queima no flare, é importante buscar utilizações para este combustível, gerando reduções de custos e aumento de produtividade. Normalmente, o aumento da utilização do GAF em fornos regeneradores permite o direcionamento do GCO para outras área da usina, reduzindo o consumo de Gás Natural.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O SOE consiste na dissolução de oxigênio na corrente do ar de combustão utilizando um *sparger* (tubo perfurado) para enriquecer o comburente. Essa prática permite que seja mantida a transferência de calor nos fornos regeneradores, assim como a temperatura de chama a partir da utilização de um combustível com menor poder calorífico. Para bons resultados, é necessária uma avaliação adequada dos regeneradores a partir de modelagem e simulação, garantindo um bom dimensionamento de equipamentos, especificação adequada dos sistemas de controle e avaliação dos benefícios.

A redução do volume de inerte do ar de combustão, através da eliminação de grande volume de nitrogênio, favorece a reação de combustão através do aumento da probabilidade de colisão entre moléculas de comburente e combustível, e ainda reduz significativamente a perda de energia do sistema, utilizada para aquecimento do gás inerte. A **figura 3-a** ilustra a redução de volume de inerte, à medida que é realizado o aumento do percentual de enriquecimento do ar com o oxigênio.

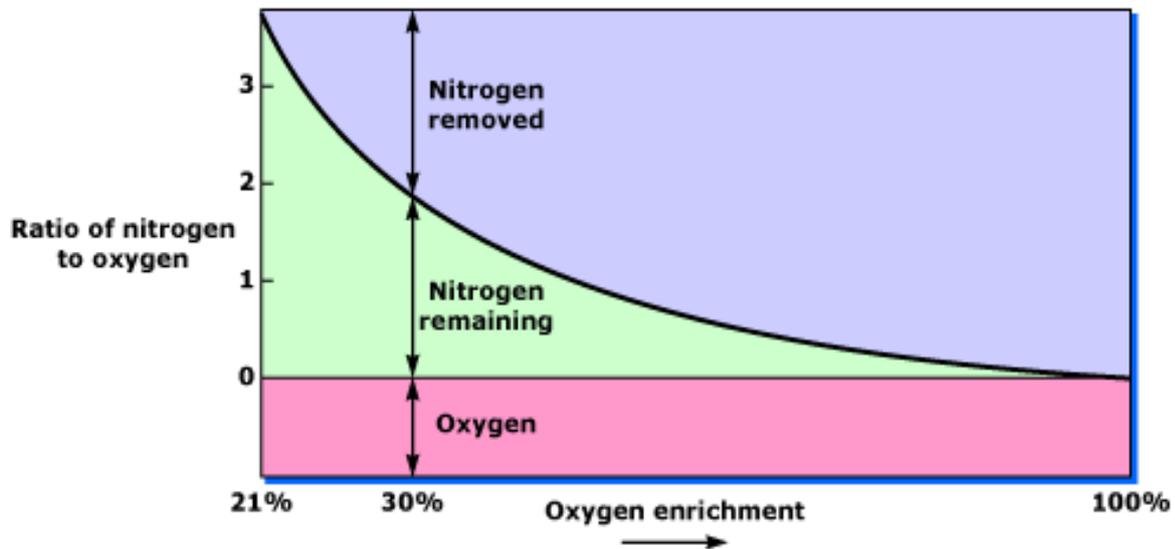


Fig. 3-a - Redução do volume de  $N_2$  x Enriquecimento  $O_2$ .

Outra característica importante decorrente do aumento do enriquecimento do ar de combustão é o aumento da intensidade luminosa da chama, que eleva muito a parcela de transferência de calor por radiação.

Para garantia de performance operacional dos regeneradores, é realizado um estudo comparativo do balanço de energia dos regeneradores, simulando o enriquecimento e a retirada parcial, ou em alguns casos total, do combustível mais nobre (GN- Gás Natural ou GCO Gás de Coqueria).

A **Tabela-1** a seguir apresenta esse estudo comparativo do balanço energético comparando o caso base (anterior ao enriquecimento), com o enriquecimento (simulação do enriquecimento) dos regeneradores.

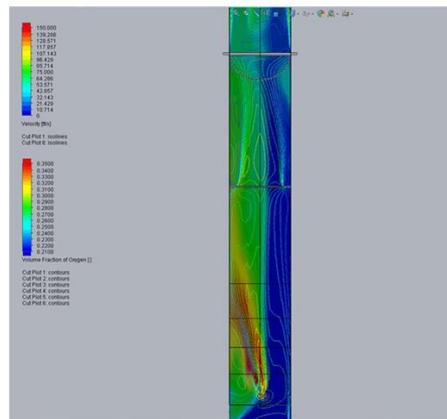
**Tabela. 1 - Estudo Enriquecimento O<sub>2</sub>.**

Variáveis		Balanço Energia - SOE					
		Caso Base			Enriquecimento		
		GAF	GCO	GMIX	GAF	GCO	GMIX
Vazão	Nm <sup>3</sup> /h	73.100	11.900	85.000	79.000	6.000	85.000
PCI	kcal/Nm <sup>3</sup>	762	4.358	1.265	762	4.358	1.016
PCS	Kcal/Nm <sup>3</sup>	780	4.868	1.352	780	4.868	1.069
Temp. Chama	°C	1.718			1.679		
Conc. O <sub>2</sub>	%	0			5		
Vazão O <sub>2</sub>	Nm <sup>3</sup> /h	0			4.012		
Ar	Nm <sup>3</sup> /h	104.224			60.927		
Energia Total	Mcal/h	90.791			114.911		
Energia Líquida	Mcal/h	13.397			13.397		

Após elaboração do balanço de energia dos regeneradores, definindo as vazões de oxigênio a serem utilizadas pelo sistema, foi realizada uma simulação da injeção nas tubulações de ar de combustão. A distribuição do fluxo de oxigênio pelas tubulações e *spargers* é analisada, visando garantir a segurança operacional, com as concentrações e velocidades do fluxo gasoso estando abaixo dos índices críticos de processo.

As **figuras 3-b.a** e **3-c.b** ilustram as simulações, geradas para garantia da segurança operacional.

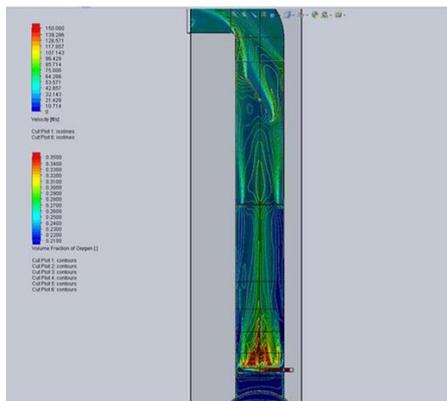
## Simulação Mistura O<sub>2</sub> dos HS



A concentração máxima de oxigênio na parede do tubo é de 32%, com velocidade inferior a 75 ft/s (23 m/s). Estando dentro dos limites operacionais de 35% de concentração e 150 ft/s (46m/s). Este arranjo de montagem é recomendado igualmente para os spargers de 4" e 6".

**Fig. 3-b - Estudo dissolução O<sub>2</sub> – Tubulação**

## Simulação Mistura O<sub>2</sub> dos HS



Vista lateral, mostrando a homogeneização do enriquecimento com oxigênio. Nenhum problema de concentração de oxigênio ou velocidade mostrado.

**Fig. 3-c - Estudo dissolução O<sub>2</sub> – Sparger**

A simulação computacional da injeção também tem o objetivo de definir a melhor localização dos *spargers*. O posicionamento adequado garante que a dissolução do oxigênio nas linhas de ar de combustão será homogênea até que o fluxo do ar enriquecido chegue na câmara de combustão, garantindo uniformidade da queima.

A **Figura 3-d** apresenta uma foto ilustrativa de um sparger, e a **Figura 3-e**, o projeto desenvolvido para instalação do sparger



Fig. 3-d - Foto ilustrativa do Sparger

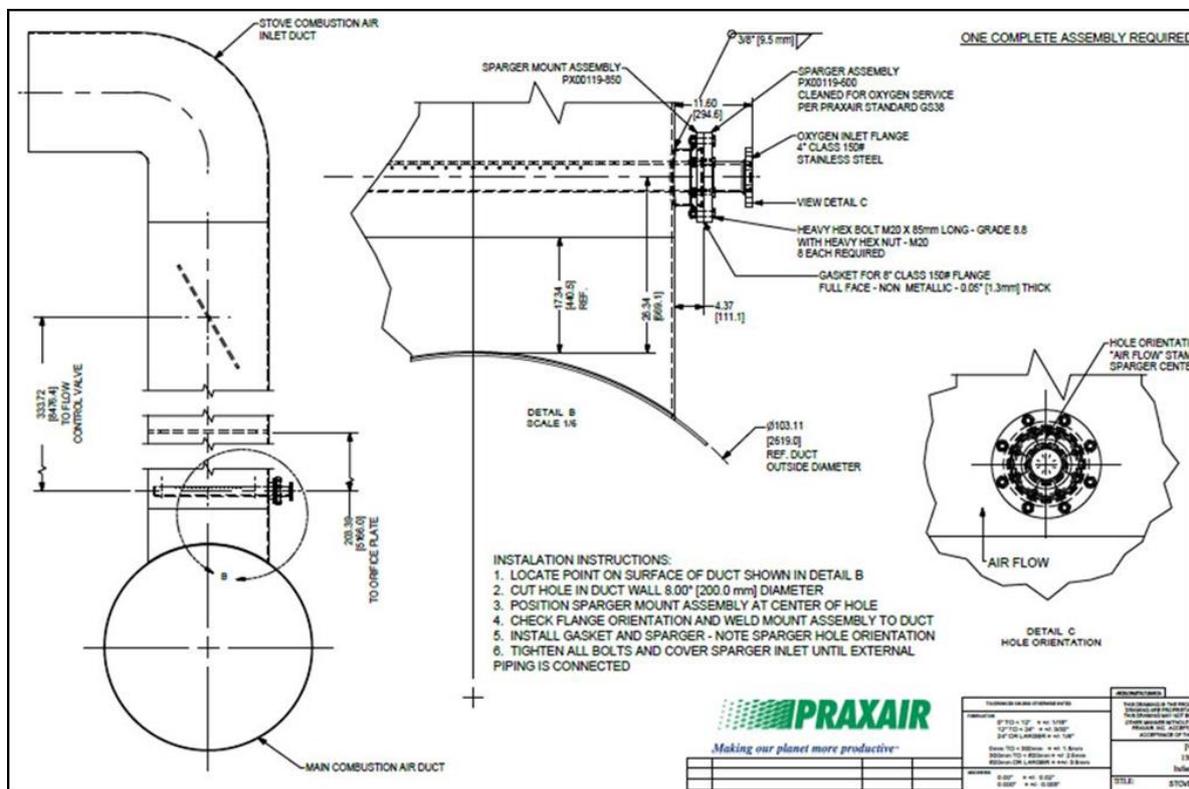


Fig. 3-e - Projeto Instalação do Sparger

O desenvolvimento do projeto para do cavalete de válvulas (*skid*) para controle de vazão do enriquecimento nas quatro linhas de ar de combustão leva em consideração as vazões mínimas e máxima estimadas no balanço de energia. O cavalete de válvulas desenvolvido pela White Martins obedece às normas internacionais de qualidade e segurança para trabalho com oxigênio. Mecanismos de intertravamento e segurança devem, obrigatoriamente, ser adotados e validados em uma reunião com todos os envolvidos no processo no início do projeto. O

controle do enriquecimento do ar de combustão deve ser individualizado para cada regenerador, a fim de permitir flexibilidade no controle de processo.

A **Figura 3-f** apresenta uma foto do rack de válvulas desenvolvido pela White Martins.



**Fig. 3-f - Rack de válvulas (Skid)**

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

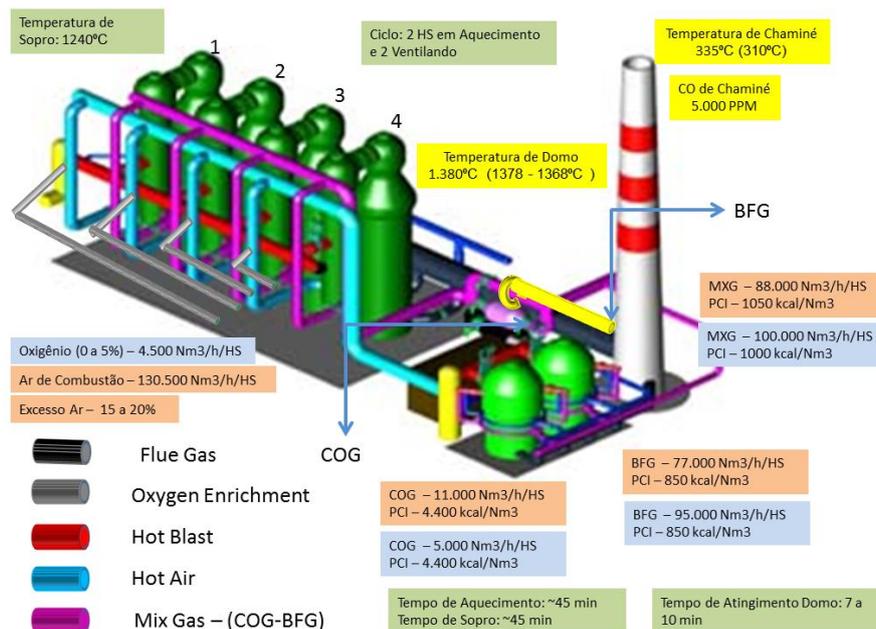
Os resultados do SOE são imediatos e a implantação do sistema é “transparente”, ou seja, sem gerar atividades adicionais a operação. O enriquecimento com oxigênio é usado para, inicialmente, controlar a temperatura do domo dos regeneradores. O nível de enriquecimento é reduzido para evitar que o domo seja demasiadamente aquecido. Além do enriquecimento do ar de combustão, outras variáveis também podem ser manipuladas para evitar o aquecimento demasiado do domo: PCI da mistura de combustíveis e excesso de comburente.

Podemos listar os resultados a seguir:

- Substituição de combustíveis de valor econômico elevado por um combustível que antes era queimado no *flare*;
- O GCO torna-se disponível para outras aplicações, como a laminação e geração própria de energia reduzindo as necessidades de compras de GN;
- Redução de emissões de CO<sub>2</sub>;
- Manutenção da temperatura de chama e taxa de transferência de calor nos regeneradores;

- Controle da temperatura do domo permite otimização do uso do oxigênio e maximização do aquecimento dos regeneradores;
- Possibilidade de elevar a temperatura do ar de processo, podendo até resultar em redução no consumo de coque no alto-forno.

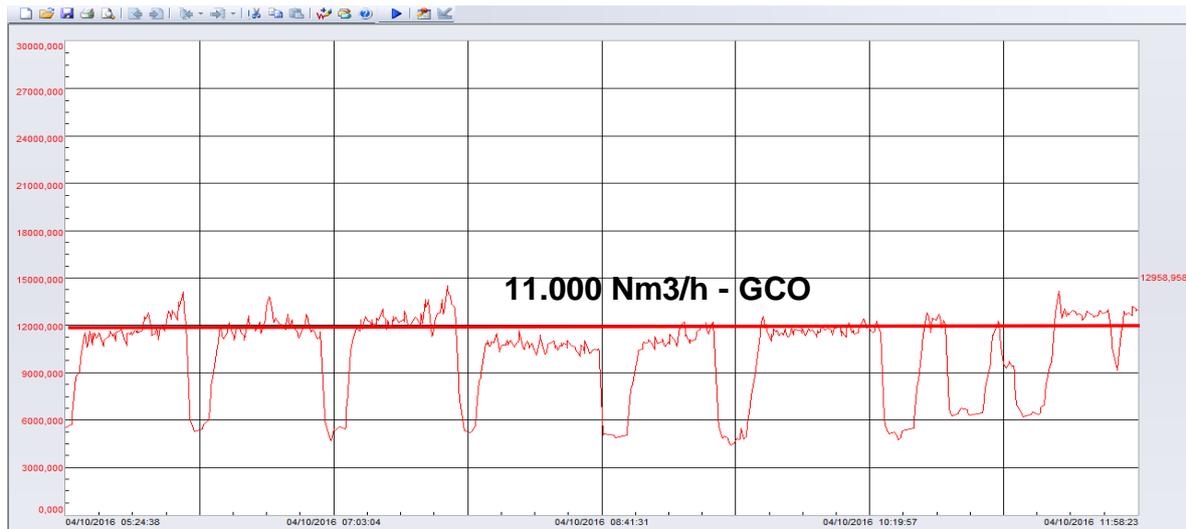
Os resultados apresentados nas figuras 4-a abaixo foram obtidos com o enriquecimento com oxigênio em alto forno que opera com quatro regeneradores providos de câmara de combustão externa.



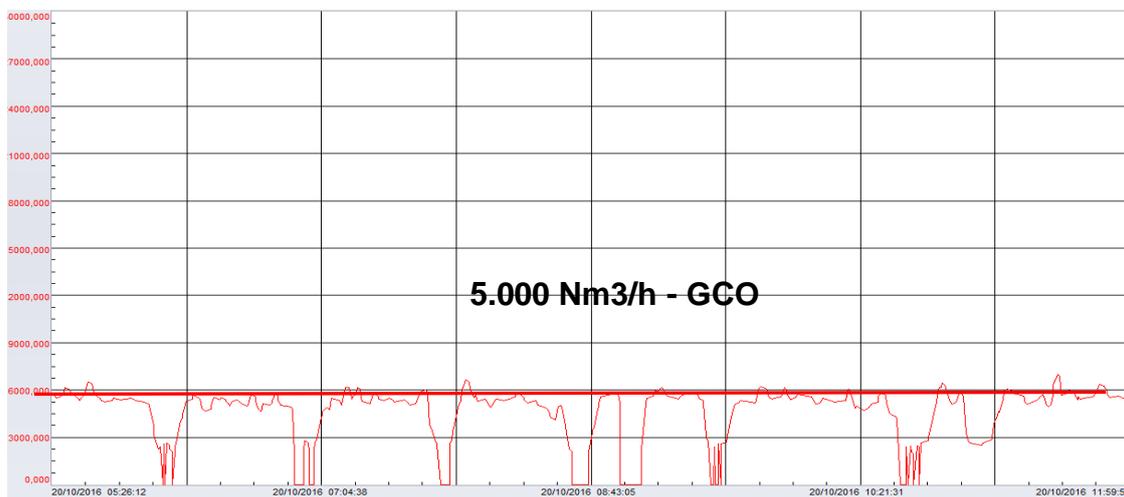
**Fig. 4-a - Esquema para interligação do enriquecimento dos regeneradores**

A redução no consumo de GCO obtida foi de cerca de 50%, conforme demonstrado nas figuras a seguir.

A **Figura 4-b** ilustra o consumo de GCO para os regeneradores antes da implantação do enriquecimento do ar de combustão dos regeneradores (HS's). Este consumo, era da ordem de 11.000 Nm<sup>3</sup>/h de GCO. A **Figura 4-c** ilustra o consumo de GCO para os regeneradores após implantação do enriquecimento do ar de combustão nos regeneradores (HS's), reduzindo o consumo de GCO a valores próximos a 5.000 Nm<sup>3</sup>/h.



**Fig. 4-b - Gráfico consumo GCO antes do enriquecimento dos regeneradores**



**Fig. 4-c - Gráfico consumo GCO após do enriquecimento dos regeneradores**

## 5 CONCLUSÃO

O enriquecimento do ar de combustão dos regeneradores dos altos-fornos possui resultados confiáveis e não demanda grandes alterações na rotina operacional. Os principais benefícios são:

- Redução do volume de emissões devido a menor queima de GAF
- Aumento da parcela radiação da chama
- Melhora na eficiência de combustão
- Redução de consumo de combustível
- Redução de custo
- Flexibilidade operacional

## REFERÊNCIAS

- 1 AISTech 2008: Mario Hernandez, Jim Kelly. Stove Oxygen Enrichment at No. 7 Blast Furnace, Pittsburg, May 2008
- 2 NBR12313: ABNT – Associação de Normas Técnicas, Sistema de combustão - Controle e segurança para utilização de gases combustíveis em processos de baixa e alta temperatura. 2000; 2-33