

ENRIQUECIMENTO DO COMBURENTE NOS REGENERADORES DE ALTOS FORNOS (*STOVE OXYGEN ENRICHMENT – SOE*) – ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ¹

Pedro Athias Zagury ²

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. Diversas tecnologias desenvolvidas pela Empresa, como o *CoJet*[®] (sistema para injeção de jato coerente de oxigênio em fornos elétricos e conversores), *Slag Splashing* (espalhamento de escória nas paredes de conversores, aumentando a vida útil dos refratários), *AOD* (processo para produção de aços especiais) e outros, encontram-se em operação comercial atualmente em diferentes partes do mundo. 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. Seu portfólio inclui gases atmosféricos, produção de gás carbônico, acetileno, hidrogênio, gases especiais e medicinais, misturas para soldagem, cilindros de aço sem costura, equipamentos para aplicação, transporte e armazenamento de gases. Recentemente a empresa iniciou a operação de uma unidade para liquefação de gás natural. 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 a 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: Alto-forno; Regeneradores; Oxigênio; Enriquecimento; Economia.

OXYGEN ENRICHMENT IN BLAST FURNACE STOVES COMBUSTION AIR – STOVE OXYGEN ENRICHMENT (SOE) – FUEL SAVING AND ENERGY EFFICIENCY

Abstract

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. Several technologies developed by the Company, such as *CoJet*[®] (a system to coherent oxygen jet injection in EAF and BOF furnaces), *Slag Splashing* (splashing slag to cover BOF furnaces walls increasing refractory wear campaign life), *AOD* (a process for special steel production) and others, are currently in commercial operation in different parts of the world. In Brazil, Praxair is the owner of White Martins, the largest industrial gases company in South America, present in nine countries of the continent. Company's portfolio includes atmospheric gases, carbonic gas production, acetylene, hydrogen, special and health and care gases, mixtures for welding, gas seamless steel cylinders, applications equipment, and storage and gases transportation. Recently the Company has started the operation of a natural gas liquefaction unit. 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.

Key words: Blast furnace; Stove; Oxygen; Enrichment; Savings

¹ *Contribuição técnica ao 23º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 13 a 15 de agosto de 2008, Porto Seguro, BA*

² *Engenheiro de Aplicações Metal/Siderurgia – White Martins Gases Industriais Ltda.*

1 INTRODUÇÃO

Os principais benefícios da utilização de tecnologias que utilizam a combustão com oxigênio são o aumento da eficiência do processo, gerando redução no consumo de combustível, a possibilidade de utilizar combustíveis de menor poder calorífico antes descartados e a redução das emissões de CO₂ para a atmosfera, gás causador do efeito estufa.

Todos esses benefícios reunidos aumentam a eficiência energética da indústria, gerando significativas reduções de custo. Cabe ressaltar que a redução no consumo de combustíveis fósseis é capaz de diminuir a dependência destes insumos, dados os preços em constante crescimento e o iminente risco de fornecimento.

Com a assinatura do protocolo de Kyoto, a redução de emissões de CO₂ vem criando valor para potenciais usuários de tecnologias óxi-combustível. O Protocolo de Kyoto reúne 35 países desenvolvidos que acordaram reduzir em 5% (com base nos dados de 1990) os níveis de emissões de gases causadores do efeito estufa entre os anos de 2008 e 2012. O Protocolo de Kyoto, também estabelece mecanismos flexíveis para baixar o custo de redução das emissões. Fundamentalmente, este mecanismo se aplica sobre certas indústrias em países desenvolvidos, que caso não consigam reduzir suas emissões até os níveis estabelecidos, podem comprar direitos de emissão (Créditos de Carbono) de empresas de países em desenvolvimento que investem em projetos desta natureza. O enriquecimento do ar de combustão com oxigênio, conhecido com *Stove Oxygen Enrichment (SOE)*, é capaz de atender a essas demandas, gerando benefícios ambientais e operacionais, aumentando a produtividade dos fornos regeneradores.

2 DESCRIÇÃO DA TECNOLOGIA

2.1 Combustão nos Fornos Regeneradores

O gás de alto forno, com uma composição típica mostrada na Tabela 1 não possui um poder calorífico suficientemente elevado para permitir o aquecimento dos fornos regeneradores com a rapidez e eficiência necessários. O poder calorífico deste combustível é em média igual a 820 kcal/Nm³ e sua combustão com ar a 21°C e 1% de excesso, proporciona uma temperatura de chama equivalente a 1.270°C e não atende aos requisitos do processo.

Tabela 1. Composição Típica do Gás de Alto Forno

Componente	Concentração
Combustíveis	27%
CO	24%
H ₂	3%
Inertes	73%
N ₂	47%
CO ₂	20%
H ₂ O	6%

Fonte: Praxair Technology Center.

Para solucionar este problema e aquecer os regeneradores de maneira adequada, a prática usual das siderúrgicas é enriquecer o gás de alto forno com um combustível de alto poder calorífico, onde os mais utilizados são o gás de coqueria e o gás natural. Os poderes caloríficos destes gases são em média, respectivamente iguais a 4.300 kcal/Nm³ e 9.400 kcal/Nm³.

A adição de aproximadamente 1% de gás natural na composição do gás de alto forno é capaz de elevar o poder calorífico da mistura até 900 kcal/Nm³, conforme mostrado na Tabela 2. Nesse caso, a combustão com ar a 21°C e excesso de oxigênio igual a 1% gera uma temperatura de chama igual a 1.315°C, atendendo aos requisitos de processo para o aquecimento adequado dos regeneradores.

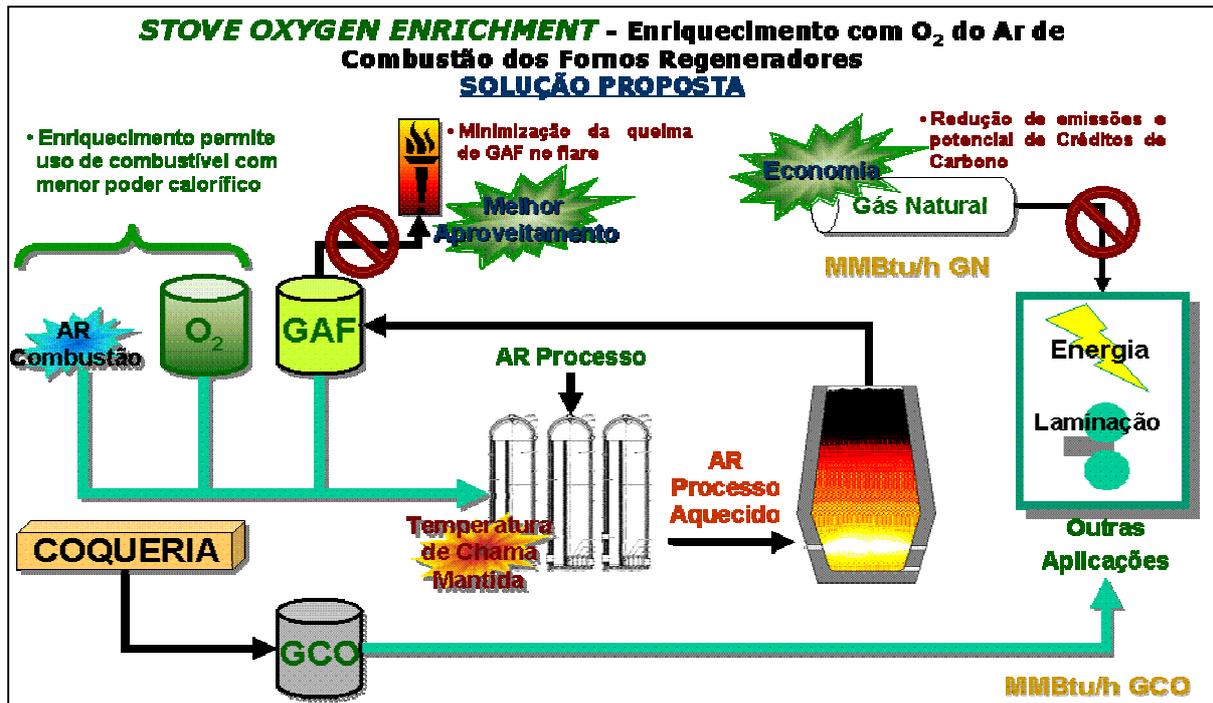
Tabela 2. Composição Típica do Gás de Alto Forno Enriquecido com Gás Natural

Componente	Concentração
Combustíveis	27,73%
CH ₄	1%
CO	23,76%
H ₂	2,97%
Inertes	72,27%
N ₂	46,53%
CO ₂	19,80%
H ₂ O	5,94%

Fonte: Praxair Technology Center.

Apesar de ser bastante usado, este procedimento acarreta custos às siderúrgicas, dada a escalada de preços dos insumos energéticos que vem sendo observada nos últimos anos. Este procedimento gera custos elevados até mesmo as siderúrgicas que utilizam o gás de coqueria para elevar o poder calorífico do gás de alto forno que poderia ser direcionado para outras aplicações mais nobres, como a laminação e a geração própria de energia elétrica, evitando a aquisição de gás natural.

Para reduzir, ou até mesmo eliminar, o uso de um combustível de maior poder calorífico no aquecimento dos regeneradores, é possível melhorar o rendimento do processo de combustão com uso de oxigênio puro enriquecendo a corrente do ar de combustão. Este processo, que também é conhecido como SOE – *Stove Oxygen Enrichment* vem sendo a cada dia mais utilizado em diversas siderúrgicas de diferentes regiões do mundo. O diagrama esquemático da instalação do SOE está mostrado na Figura 1, onde o ar de combustão é enriquecido com oxigênio.



Fonte: Praxair Technology Center.

Figura 1. Diagrama esquemático da instalação do SOE (GAF – Gás de Alto Forno; GCO – Gás de Coqueria)

2.2 Substituição de Combustíveis nos Regeneradores

O principal objetivo do SOE é manter a transferência de calor para os regeneradores a partir das seguintes premissas:

- Usar a maior quantidade possível de gás de alto forno e ar enriquecido com oxigênio;
- Buscar a máxima redução no consumo do combustível de maior poder calorífico, atingindo os melhores resultados possíveis;
- Manter a temperatura de chama observada durante a combustão com ar;
- Manter o volume dos gases de combustão;
- Fazer a substituição sem afetar a operação dos regeneradores.

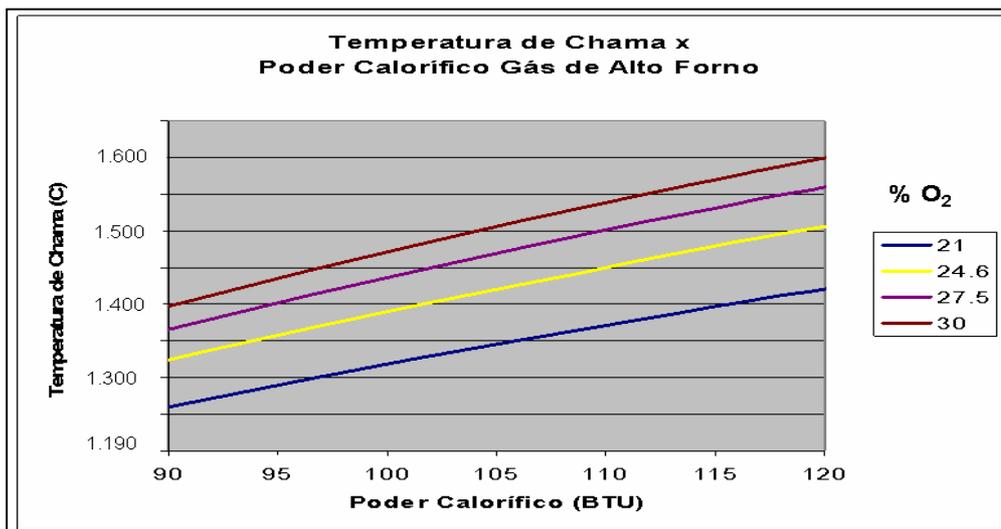
A adição de oxigênio na corrente do ar de combustão tem o objetivo de remover inerte do comburente, compensando a maior quantidade de inerte presente no gás de alto forno. Ou seja, deve ser removida do comburente, aproximadamente a mesma quantidade de inerte que será trazida pelo novo combustível de menor poder calorífico, conforme mostrado na Tabela 3, tornando equivalentes os poderes caloríficos da mistura ar-metano e oxigênio-gás de alto forno (GAF).

Tabela 3. Remoção de inerte do comburente – equalizando o poder calorífico

AR - METANO		OXIGÊNIO - GAF	
Metano 1.000 Nm ³	1.000 Nm ³ CH ₄	GAF 11.745 Nm ³	2.820 Nm ³ CO
			352 Nm ³ H ₂
			5.520 Nm³ N₂ (Inerte)
			2.349 Nm³ CO₂ (Inerte)
			704 Nm ³ H ₂ O
Ar 10.360 Nm ³	2.110 Nm ³ O ₂	Oxigênio 1.705 Nm ³	1.705 Nm ³ O ₂
	7.990 Nm³ N₂ (Inerte)		
	260 Nm ³ H ₂ O		

Fonte: Praxair Technology Center.

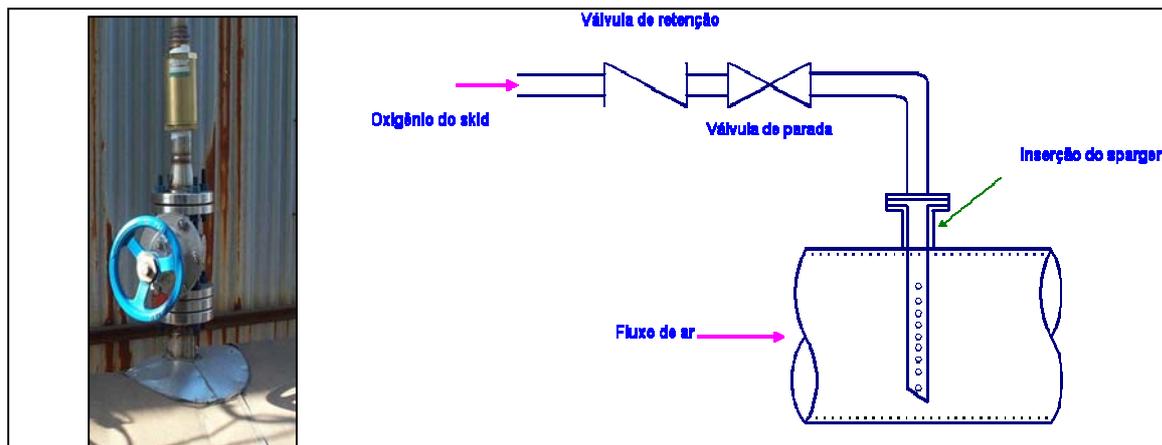
A composição do gás de alto forno não é constante e varia ao longo do tempo, dependendo das características das matérias-primas que estão sendo utilizadas. Sendo assim, o poder calorífico do combustível também apresenta variações. Por esse motivo, a temperatura de chama pode variar, podendo ser controlada regulando a composição de oxigênio no comburente, como mostra a Figura 2.



Fonte: Praxair Technology Center.

Figura 2. Temperatura de chama do gás de alto forno e grau de enriquecimento

Para garantir os bons resultados do processo, torna-se necessário um controle individual do enriquecimento com oxigênio para cada forno regenerador. É necessária a construção de uma Estação de Controle do Enriquecimento, composta por válvulas e instrumentos com a finalidade de controlar vazão e pressão do oxigênio a ser diluído na corrente de ar. A diluição dos gases na corrente é realizada por meio de *spargers*, tubos perfurados montados sobre a tubulação de ar, conforme mostrado na Figura 3.



Fonte: Praxair Technology Center

Figura 3. Sparger montado sobre tubulação de ar para diluir oxigênio no fluxo

3 RESULTADOS

O SOE é uma aplicação fundamentada, encontrada em diferentes siderúrgicas ao redor do mundo e com resultados positivos comprovados. O novo consumo de oxigênio tem sido capaz de compensar as significativas economias de combustível obtidas, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Aplicações do SOE e seus respectivos números

Capacidade do Alto Forno (t/dia de ferro gusa)	Combustível	Economia de Combustível (Nm ³ /h)	Consumo de Oxigênio (Nm ³ /h)	Taxa de Substituição Oxigênio / Combustível
3.700	Gás Natural	4.300	1.950	2,21
10.000	Gás Natural	5.400	9.700	1,80

Fonte: Praxair Technology Center

Outras vantagens do SOE são o possível aumento da temperatura do ar de processo, caso o alto forno permita tal incremento. Temperaturas superiores do ar de processo permitem a redução do consumo específico de coque por tonelada de gusa produzida, reduzindo os custos de produção do aço.

O SOE também permite que problemas relacionados à limitação dos sopradores de ar de combustão, como por exemplo, quando as pilhas de refratário encontram-se desgastadas. O enriquecimento com oxigênio reduz o consumo do comburente e a vazão de gases dentro dos regeneradores também é reduzida, outro fator que ajuda a não sobrecarregar os sopradores.

Por fim, as reduções de emissões de carbono para a atmosfera são reduzidas à medida que gás de alto forno passa a ser aproveitado no processo e deixa de ser queimado no *flare*.

4 DISCUSSÃO

A busca por eficiência energética torna-se a cada dia uma necessidade maior para as siderúrgicas. A escalada dos preços dos derivados de petróleo vem sendo observada ao longo dos últimos anos. A crescente demanda pelos derivados de petróleo tem estimulado o homem a buscar reservas em condições de exploração cada vez mais adversas, demandando maiores investimentos para exploração e

elevando os custos de produção. Como consequência, ocorre à elevação os preços do petróleo e seus derivados. Fatores políticos e econômicos também têm contribuído para a elevação dos preços dos combustíveis fósseis, que não irão retornar aos antigos patamares. A Figura 4 mostra a evolução dos preços do barril de petróleo ao longo dos últimos anos, base para os preços dos energéticos.



Fonte: Energy Information Administration – Official Energy Statistics from the U.S. Government

Figura 4. Temperatura de chama do gás de alto forno e grau de enriquecimento

No caso de uma siderúrgica que utiliza o gás de coqueria para elevar o poder calorífico do combustível queimado nos regeneradores, a economia de gás natural em outras áreas da usina é determinada pela razão entre o poder calorífico do gás de coqueria e do gás natural. A razão média entre os poderes caloríficos destes combustíveis é de aproximadamente 0,48. Isso significa dizer que para cada 1 Nm³ de gás de coqueria economizado na usina, 0,48 Nm³ de gás natural deixarão de ser consumidos.

No exemplo mostrado abaixo na Tabela 5, o oxigênio é utilizado para permitir a redução no consumo do gás de coqueria para elevação do poder calorífico do combustível, mantendo a temperatura de chama em 1.400 °C. Nesse caso, 6.800 Nm³/h de gás de coqueria, representando 100% de redução, estão sendo substituídos pelo comburente enriquecido com oxigênio puro. Este valor representa uma economia equivalente a 3.246 Nm³/h de gás natural que deixam de ser comprados pela usina.

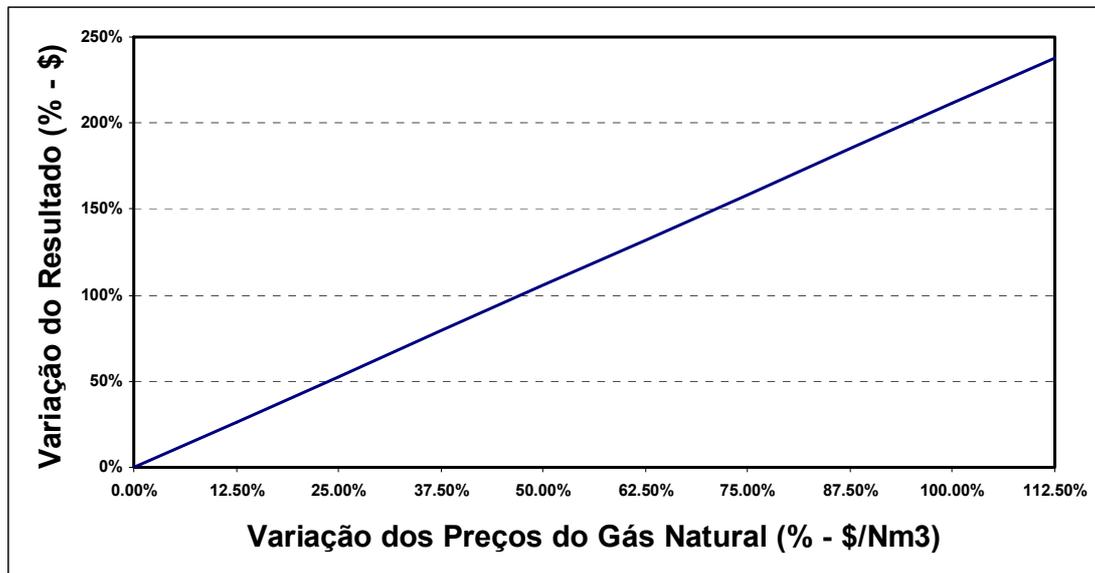
Essa quantidade de gás natural que deixa de ser consumida também representa redução dos níveis de emissões de carbono para a atmosfera. Neste caso, cerca de 4.000 Nm³/h de CO₂ estariam deixando de ser emitidos.

Tabela 5. Aplicações do SOE e seus respectivos números

Consumos / Parâmetros	Com Gás de Coqueria	Sem Gás de Coqueria
Gás de Coqueria (Nm ³ /h)	6.800	-
Oxigênio (Nm ³ /h)	-	7.600
Comburente (Nm ³ /h)	81.550	49.300
Gás de Alto Forno (Nm ³ /h)	76.500	117.000
Temperatura de Chama (°C)	1.400	1.400
Gases da Chaminé (Nm ³ /h)	152.000	151.200

Fonte: Praxair Technology Center

No exemplo anteriormente descrito, para cada 1% de aumento no preço do gás natural, o resultado do SOE aumenta 2,1%, conforme descrito na análise de sensibilidade no gráfico da Figura 5.



Fonte: *Energy Information Administration – Official Energy Statistics from the U.S. Government*
Figura 5. Variação do resultado do SOE e variação do preço do combustível

5 CONCLUSÃO

Para garantir os bons resultados é necessário ter um bom conhecimento da tecnologia e ser feita simulação e balanço de massa dos fornos regeneradores, para determinar de maneira correta a temperatura de chama a ser obtida após a adição do oxigênio, além dos benefícios e consumos de combustível. Estes parâmetros precisam ser bem determinados, pois é necessário construir uma tubulação para levar o oxigênio até a Estação de Controle de Enriquecimento, que precisa ser adequadamente projetada e construída. O controle do enriquecimento deve ser individual para cada forno regenerador para otimizar os resultados.

A tecnologia SOE está alinhada com as tendências da economia mundial para os próximos anos. A legislação ambiental mais rígida, forçando as empresas a reduzirem suas emissões de carbono para a atmosfera e o risco de abastecimento de combustíveis fósseis faz com que as siderúrgicas tenham que buscar alternativas para suprir sua matriz energética. Cabe ressaltar, que os resultados do SOE são extremamente sensíveis a pequenas variações nos preços dos energéticos. Dessa forma, o SOE pode ser visto como uma forma das siderúrgicas protegerem seus custos de eventuais instabilidades na economia mundial.