



BALANÇO EXERGÉTICO DA INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO EM ALTO-FORNO¹

Tiago Luis Oliveira²
Giane Aparecida Silva³
Antônio Carlos Meneghin⁴
Paulo Santos Assis⁵

Resumo

A necessidade por rastreabilidade de processos aliada aos valores agregados às etapas de produção promovem a oportunidade de estabelecer relações interdisciplinares no sentido de identificar perdas durante o processo produtivo e por consequência, uma tomada de ação para aperfeiçoar o processo com parâmetros operacionais compatíveis com o binômio de despesas e receitas. O tratamento termodinâmico será aplicado ao processo de injeção de carvão pulverizado em ventaneiras para verificar a eficiência deste processo permitindo a tomada de ações frente às condições operacionais da injeção de carvão pulverizado.

Palavras-chave: Exergia; Entropia; Irreversibilidade; Zona de combustão.

EXERGY BALANCE OF PULVERIZED COAL INJECTION IN BLAST FURNACE

Abstract

The necessity of to investigate the process with the aggregate value the phases of production bring the opportunity of a firm interdisciplinary relation, in meaning to identify damages during the productive process and for consequence, an action to improve the process with parameters of work compatible with the binary cost and profit. The thermodynamic management is applied at a process of coal injection in tuyere, checking the efficiency of the process, allowing acting in front of the conditions of work of the injection of pulverized coal.

Key words: Exergy; Entropy; Irreversibility; Raceway.

¹ Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Membro da ABM. Engenheiro Mecânico, Cet- Cefet/MG Prof., 35450-000, Itabirito(MG), Brasil. Email: tiagoluiscg@yahoo.com.br

³ Membro da ABM. Engenheira de Produção, gianeapasilva@yahoo.com.br

⁴ Membro da ABM. Engenheiro Geólogo, Ligas de Alumínio S/A-LIASA, 39270-000, Pirapora (MG), Brasil. E-mail: geo@liasa.com.br

⁵ Membro da ABM. Prof Titular da Escola de Minas – UFOP. Prof. da REDEMAT, Prof. Honorário da HUST-China. Pesquisador do CNPq. 35400-000 Ouro Preto, Brasil. E-mail: assis@em.ufop.br

1 INTRODUÇÃO

Na termodinâmica, define-se a exergia de um sistema como o máximo trabalho teórico que pode ser obtido de um processo até que seja estabelecido um equilíbrio termodinâmico. A exergia é uma propriedade do sistema que quantifica seu potencial de uso. Ou seja, dado um sistema em um determinado estado, a exergia demonstra quanto de trabalho útil pode ser obtido desse sistema. Sabe-se que a energia nunca é destruída durante um processo, ela apenas muda de uma forma para outra. Em contrapartida, a exergia é destruída em processos irreversíveis em virtude do aumento da entropia.

A injeção de finos de carvão pulverizado já é uma técnica consagrada, por reduzir os custos de produção de gusa através da diminuição do consumo de combustíveis redutores mais caros. A exergia como propriedade física e a geração de entropia como o efeito de um processo irreversível estão ligados à eficiência exergética e por consequência em eficiência econômica dos processos de redução direta e indireta em altos-fornos. Aliando os conceitos de redução dos custos de produção do gusa com a injeção de carvão pulverizado e análise exergética, relacionada ao uso deste combustível, pode-se chegar a resultados econômicos ótimos.

Como vários outros, o processo de injeção de carvão pulverizado, em alguns momentos, fica susceptível a falhas, uma delas refere-se à variação do fluxo da taxa de injeção de carvão em frente às ventaneiras. Esta variação pode ser comumente atribuída ao descontrole na parte de automação ou em válvulas mecânicas, além de entupimento lanças e tubulações de injeção. Estando um alto-forno preparado para operar nas condições em que se faz necessária a injeção de carvão pulverizado, colocam-se em questão quais os efeitos que a redução do fluxo de carvão em frente a uma ou mais ventaneiras poderia provocar em relação a perdas térmicas. Pretende-se, portanto, quantificar o potencial exergético e posteriormente as perdas geradas no *raceway* através de uma análise de fatores irreversíveis acondicionados pela variação da injeção.

2 OBJETIVOS

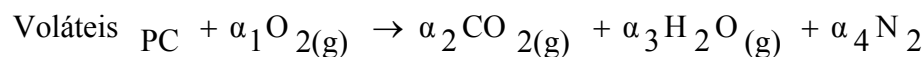
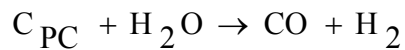
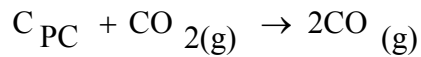
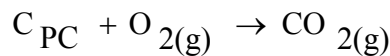
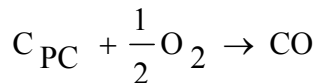
Busca-se quantificar o potencial exergético e posteriormente as perdas geradas no *raceway* através de uma análise de fatores irreversíveis acondicionados a variações operacionais, bem como estimar os ganhos financeiros potenciais de benefícios oriundos dos ganhos técnicos acima referenciados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

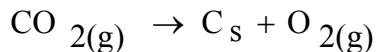
Assis e Martins⁽¹⁾ explicam que a tecnologia de injeção de carvão pulverizado tem sido praticada no mundo inteiro. Existem, atualmente, mais de 400 altos-fornos que praticam esta técnica, sendo que em mais de 70% de todos os altos-fornos no mundo já se usa algum tipo de injeção de materiais sólidos.

Conforme Assis,⁽²⁾ o carvão pulverizado é injetado em ventaneiras, no mesmo duto onde é soprado o ar quente. Dentro do *raceway* (zona de combustão) o carvão sofre desvolatilização e queima gerando calor e gases. O calor gerado nesse processo irá aquecer a carga e os gases (CO e H₂) irão reduzir a carga metálica.

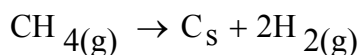
As reações químicas envolvendo a combustão no race-way, segundo Baltazar, Castro e Silva,⁽³⁾ estão descritas logo abaixo.



Conforme Castro e Tavares⁽⁴⁾ algumas condições devem ser consideradas em relação a um balanço de massa na zona de combustão. Primeiramente o CO e o H₂ não reagem na zona de combustão e o CO₂ se dissocia segundo a reação:



Outra condição é que o O₂ obtido acima será queimado junto ao O₂ do ar e o CH₄ se dissocia segundo a reação abaixo:



Tem-se também como condição que o C obtido acima reagirá da mesma forma que o C do topo.

Assis⁽⁵⁾ explica que a temperatura de chama é, por definição, a temperatura que os gases saem da zona de combustão. A temperatura de chama é calculada sendo consideradas as condições adiabáticas, dessa forma, as perdas térmicas não são levadas em conta, portanto a temperatura de chama sempre é maior que a real.

Sonntang e Borgnakke⁽⁶⁾ explicam que um sistema termodinâmico consiste em uma combinação de dispositivos que contém uma quantidade de matéria a ser estudada. Define ainda, que um volume de controle pode ser escolhido ficando a matéria contida dentro de uma superfície de controle. Tudo que for externo ao sistema de controle é chamado de vizinhança ou exterior e o sistema são separados da vizinhança por meio das fronteiras, sendo estas moveis ou fixas.

Conforme Faires e Simmang⁽⁷⁾ a primeira lei da termodinâmica determina que para um sistema que efetua um ciclo, a integral cíclica do calor é igual à integral cíclica do trabalho. Dessa forma, a primeira lei não impõe nenhuma restrição quanto à direção do fluxo de calor e trabalho. Um ciclo no qual uma quantidade de calor é cedida pelo sistema e outra equivalente de trabalho é recebida pelo sistema satisfaz a primeira lei, da mesma maneira que um ciclo onde as trocas de calor e trabalho se dão em sentido oposto.

Çengel e Boiles⁽⁸⁾ explicam que a partir da segunda lei da termodinâmica pode-se concluir que processos ocorrem em uma determinada direção e não na oposta. A entropia é uma propriedade extensiva e a entropia por unidade de massa

é uma propriedade intensiva. É importante observar que a entropia é definida em função de um processo reversível.

Sonntag, Borgnakke e Wylen⁽⁹⁾ citam que a entalpia de formação é mais adequada para a execução da análise da primeira lei em sistemas reagentes, pois as entalpias de substâncias diferentes podem ser somadas ou subtraídas, desde que elas sejam relativas à mesma base.

Çengel e Boiles⁽⁸⁾ destacam que a exergia denominada disponibilidade, sendo esta o máximo de trabalho útil a ser obtido em um sistema que passa por um processo entre dois estados especificados. A irreversibilidade descrita como a destruição da exergia ou trabalho perdido, refere-se ao potencial de trabalho desperdiçado durante um processo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o trabalho em questão procurou-se obter através da pesquisa bibliográfica conceitos termodinâmicos que levam a concepção de um modelo computacional para o cálculo da perda exérgica na zona de combustão de um alto-forno. Utilizando o Microsoft Excel como ferramenta para a aplicação dos cálculos termodinâmicos, pôde-se simular parâmetros operacionais de um alto-forno e submeter estes ao cálculo da exergia e analisar os tipos de perdas susceptíveis ao processo em diferentes condições.

O sistema analisado condiz com condições operacionais de um alto-forno, de médio a grande porte, sendo considerados parâmetros como vazão, temperatura e umidade de sopro e análise química do carvão injetado. Para ilustrar a condição química do carvão em Machado e Andrade⁽¹⁰⁾ puderam-se obter as características do carvão Optimum obtida da Companhia Siderúrgica Nacional, importado da África do Sul.

Tabela 1: Características químicas de carvão⁽¹⁰⁾

Materiais Voláteis %	Cinza %	Carbono %	PCS
33,3	10,63	71,9	6663,8 kcal.kg ⁻¹ 27881,34 kJkg ⁻¹

4.1 Aplicação da Exergia na Zona de Combustão

A corrida para a obtenção de produtos de melhor qualidade aliada a uma política de redução de custos bem como a diminuição das reservas energéticas fósseis, tem nos levado a tomar medidas drásticas para a redução do desperdício.

Geralmente analisamos o efeito da reação de combustão para a geração de potência, muitas análises de fenômenos irreversíveis já foram realizadas em sistemas termodinâmicos, tais como motor de um veículo ou a parede de um forno. Neste estudo, pretende-se quantificar as possíveis irreversibilidades inerentes a combustão do carvão pulverizado injetado em frente a uma ventaneira de alto-forno.

Apesar de haver inúmeros produtos intermediários em uma reação de combustão do carvão no *raceway*, por enquanto é crucial, para um estudo inicial sobre o tema, ater-se somente aos reagentes (carbono, materiais voláteis, oxigênio, nitrogênio) e produtos finais (CO, H₂ e N₂). Porém é viável e torna o modelo mais

próximo da realidade uma aplicação futura do cálculo exergetico com base em um estudo que leve em conta todos os elementos envolvidos na combustão.

Um sistema pode ser considerado como uma quantidade de matéria ou região no espaço, selecionada para o estudo. Neste contexto especificamos o alto-forno como um sistema aberto, sendo selecionada a zona de combustão como um volume de controle, visando o entendimento dos fenômenos irreversíveis inerentes a esta região.

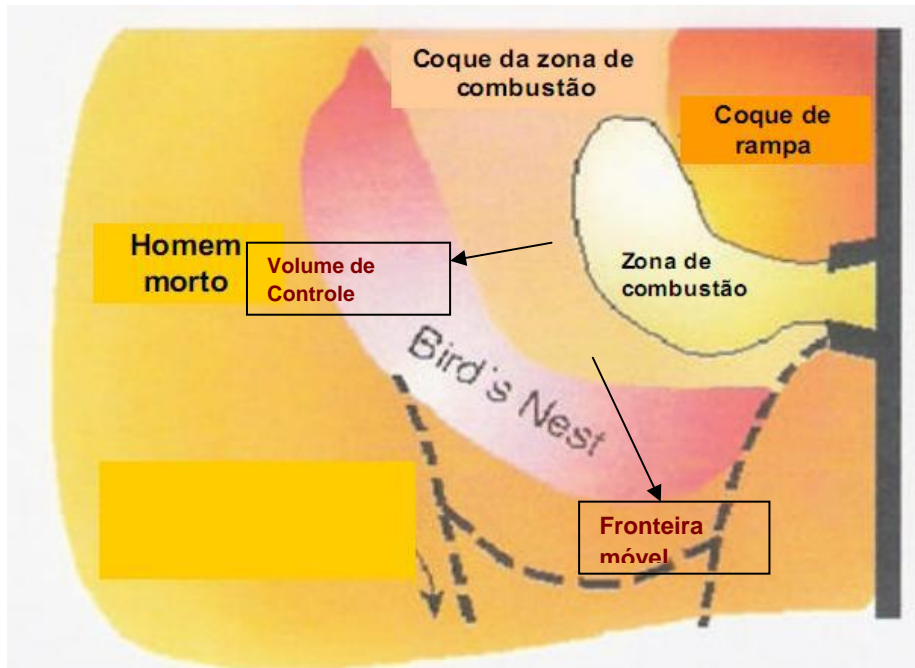


Figura 1: Ilustração da zona de combustão de uma ventaneira em Alto-forno.⁽²⁾

A zona de combustão é a fonte de energia térmica e redutora para o processo de produção de gusa. Nela reações endotérmicas e exotérmicas provocam um salto entálpico que oferece energia suficiente para a fusão da carga metálica e fundentes. Portanto, nem toda a energia, poder calorífico, fornecida ao sistema (alto-forno) será utilizada para suprir as necessidades do mesmo. Seguindo o conceito da segunda lei da termodinâmica, parte desta exergia será perdida na zona de combustão, com o desenrolar das reações químicas susceptíveis a esta zona. É com este foco que propõe-se a realização de cálculos para quantificar o valor desta perda para cada condição operacional de um alto-forno.

4.2 Demonstração de Cálculos Termodinâmicos

No intuito de quantificar as perdas exergeticas na zona de combustão de um alto-forno, a temperatura dos gases que saem do *raceway*, o trabalho irreversível, a entropia gerada e a exergia destruída devem ser determinados. Porém, antes da execução dos cálculos alguns critérios devem ser considerados, sendo estas:

- admite-se para esta situação que as condições de escoamento ocorrem em regime permanente;
- o ar e os gases envolvidos na combustão serão considerados ideais;
- as alterações das energias cinética e potencial são desprezíveis;

- a zona de combustão será considerada adiabática, dessa forma, a mesma não troca calor com a vizinhança; E
- a combustão é incompleta, sendo realizado um balanço de massa que permite o cálculo do número de moles dos elementos envolvidos na reação de acordo com os parâmetros operacionais do processo.

Assis⁽⁵⁾ descreve que a partir do equacionamento das entradas e saídas de calor e dos resultados do balanço de massa, é possível a obtenção da temperatura de chama. Para este cálculo, leva-se em conta a temperatura de sopro (T em °C), umidade (U em g/Nm³) e enriquecimento do ar em oxigênio (E em %) e taxa de injeção de oxigênio (T_{ICP} em kg/t de gusa).

$$T_{Chama} = 1267,9 + 0,9742T + 57,636E - 7,146U - 2T_{ICP} \quad (1)$$

Como a reação de combustão é considerada adiabática, a entropia gerada neste processo, equivale ao número de moles dos produtos multiplicado pela entropia dos produtos subtraída do número de moles dos reagentes multiplicado pela entropia dos reagentes.

$$\bar{S}_{gerada} = \sum N_P \bar{S}_P - \sum N_R \bar{S}_R \quad (2)$$

Irreversibilidades ou trabalho perdido geradas por reações químicas, atrito, transferência de calor com diferença de temperatura finita sempre geram entropia e conseqüentemente a destruição da exergia, dessa forma:

$$X_{destruída} = T_0 \bar{S}_{ger} \geq 0 \quad (3)$$

O trabalho máximo que pode ser realizado em um processo de combustão, denominado exergia ou disponibilidade pode ser dado pelo trabalho reversível. Dadas as condições em que se considere que reagentes e produtos estejam em equilíbrio de temperatura a função de Gibbs torna-se significativa, portanto na ausência de variações das energias cinética e potencial, o trabalho reversível poderá ser dado a partir da relação abaixo:

$$W_{rev} = \sum N_R \bar{g}_R - \sum N_P \bar{g}_P \quad (4)$$

Finalmente a exergia utilizada, ou seja, àquela não destruída durante o processo equivale a $X_u = W_{rev} - X_{destruída}$ (5)

4.3 Balanço Econômico

Através do custo do [kJ/kg] de carvão, para cada tonelada de gusa produzida, o balanço exergético realizado é convertido em balanço econômico, tornando possível um conhecimento global, em moeda corrente, das perdas econômicas inerentes às condições operacionais da injeção de carvão pulverizado no alto-forno.

De acordo com Valor Econômico apud Ministério do Planejamento Orçamento e Gestão⁽¹¹⁾ o preço de referência no mercado do carvão tipo hard (alto volátil) está em US\$ 170 a tonelada. Foi adicionado o custo proposto na memória de cálculo da análise exergética, sendo que de acordo com a quantidade de carvão consumido e a

quantidade de gusa produzida o preço de cada Gj/kg de combustível sofrerá as devidas alterações.

Segundo Assis⁽¹⁾ a economia de energia na injeção é alcançada através da equação:

$$E_T = TIMP.(CMS.TS - CMI).P \quad (6)$$

Onde:

E_T = Economia (US\$/h)

TIMP = Taxa de Injeção de Material Pulverizado (kg/t)

CMS = Custo do Material substituído (US\$/kg)

CMI = Custo do Material Injetado (US\$/kg)

O cálculo da economia de energia com injeção, levando em consideração a parcela de economia de energia com balanço exergético, é:

$$E_{Total} = E_T + E_I, \text{ dada em US\$/h.} \quad (7)$$

E_I = Economia de Energia com o Balanço Exergético

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tendo como objetivo quantificar o potencial exérgico e as perdas irreversíveis geradas no *raceway*, em função de variações operacionais, utilizou-se parâmetros de um processo de produção de gusa de um alto-forno hipotético. Sabe-se que em um processo de injeção, podem ocorrer algumas variações no controle do fluxo do carvão injetado nas ventaneiras, para a ilustração do comportamento dessas variações, foram estabelecidas três situações operacionais. Estas situações operacionais estão identificadas nas Tabelas 2 e 3. Observa-se nas Tabelas 2 e 3, que a situação 2 equivale a uma operação real, de um alto-forno hipotético, em que não há variação da taxa de injeção se comparada a taxa de injeção de carvão visada. Já as situações 1 e 3, demonstram uma variação da taxa de injeção para um alto-forno com parâmetros programados para operar com a taxa de injeção de carvão pulverizado da situação 2. Em todas as situações, considera-se uma base de coque de 11 t.

Na primeira análise exérgica, observa-se que à medida que se aumenta a quantidade de carvão há um aumento da disponibilidade e uma redução da perda exérgica, conseqüentemente o aumento da taxa de injeção caracteriza uma redução da taxa de perda.

Tabela 2: Condições de operação do alto-forno da primeira análise

Situação	Combustível		Característica do Sopros				Características do Carvão		
	Coque Rate kg/t	PCR kg/t	Vazão Nm ³ /min	Temp. °C	Umid. g/Nm ³	Enriq. de O ₂ %	C %	Umid.	MV %
1	420	50	3300	1200	20	2	71,9	1	33,3
2	420	100	3300	1200	20	2	71,9	1	33,3
3	420	200	3300	1200	20	2	71,9	1	33,3

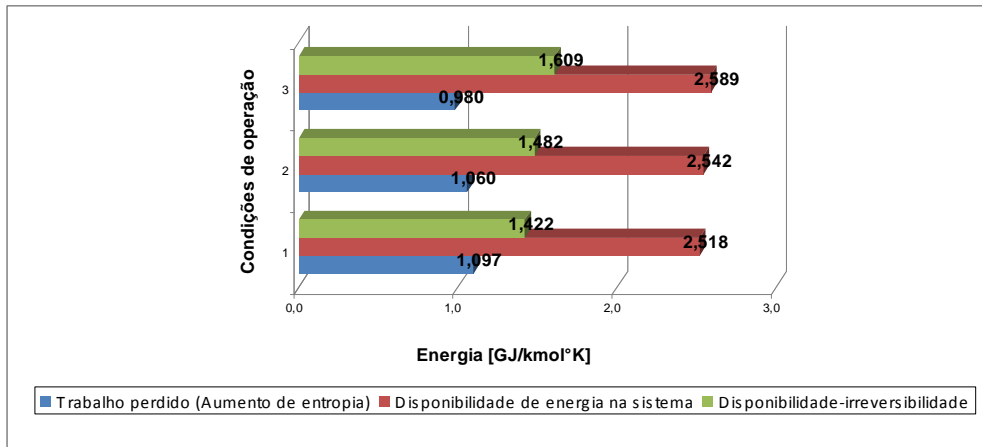


Figura 2: Comparativo de resultados das condições de operação do alto-forno (análise 1).

O comparativo de resultados acima mostra para cada uma das três condições de operação, a disponibilidade de potência, a potência perdida e a diferença entre a potência disponível e a potência perdida. Assim podemos visualizar a injeção de carvão na ventaneira e comparar os parâmetros operacionais de injeção com as potencias envolvidas na injeção de carvão.

Nas Figuras 3 e 5, colocou-se o custo da irreversibilidade no processo de injeção. Neste caso, considerou-se um custo básico real, conforme citação do item 4.3, calculado a partir de dados operacionais de uma empresa hipotética chegando ao custo por unidade de tempo da irreversibilidade para cada situação estudada.

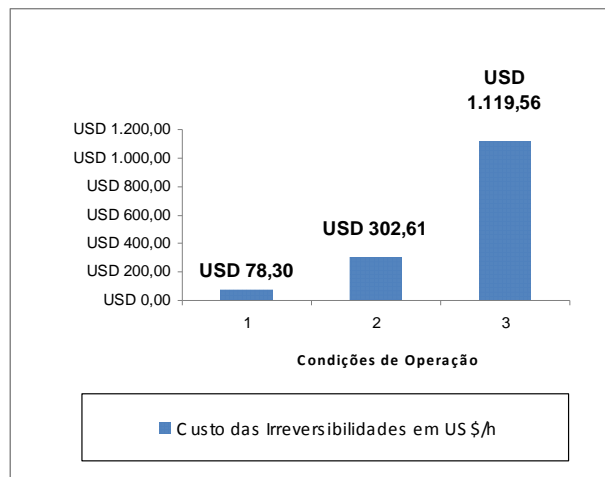


Figura 3: Comparativo dos custos das perdas para as condições de operação do alto-forno (análise1).

Analisando-se a Figura 3, nota-se uma grande variação dos custos de irreversibilidades para as três situações, isso se deve ao fato de os custos estarem atrelados à quantidade de combustível injetada, por isso, o custo na situação 3 é maior. Dessa forma, apesar de a situação 3, demonstrar um custo maior relacionado a perda, a taxa de perda desta situação é menor que das situações 1 e 2.

Verifica-se agora uma variação da taxa de injeção de carvão pulverizado em uma situação de operação hipotética um pouco diferente. Esta situação pode ser observada na tabela abaixo.

Tabela 3: Condições de operação do alto-forno da segunda análise

Situação	Combustível		Característica do Sopro				Características do Carvão		
	Coque Rate kg/t	PCR kg/t	Vazão Nm ³ /min	Temp. °C	Umid. g/Nm ³	Enriq. de O ₂ %	C %	Umid.	MV %
1	420	50	2700	1100	17,1	3,9	71,9	1	33,3
2	420	100	2700	1100	17,1	3,9	71,9	1	33,3
3	420	200	2700	1100	17,1	3,9	71,9	1	33,3

Observa-se que para esta análise foram alteradas as condições de sopro do ar, nota-se a partir daí o mesmo comportamento. À medida que se aumenta a taxa de injeção de carvão pulverizado, há um aumento da disponibilidade exergética e uma redução das perdas por irreversibilidades.

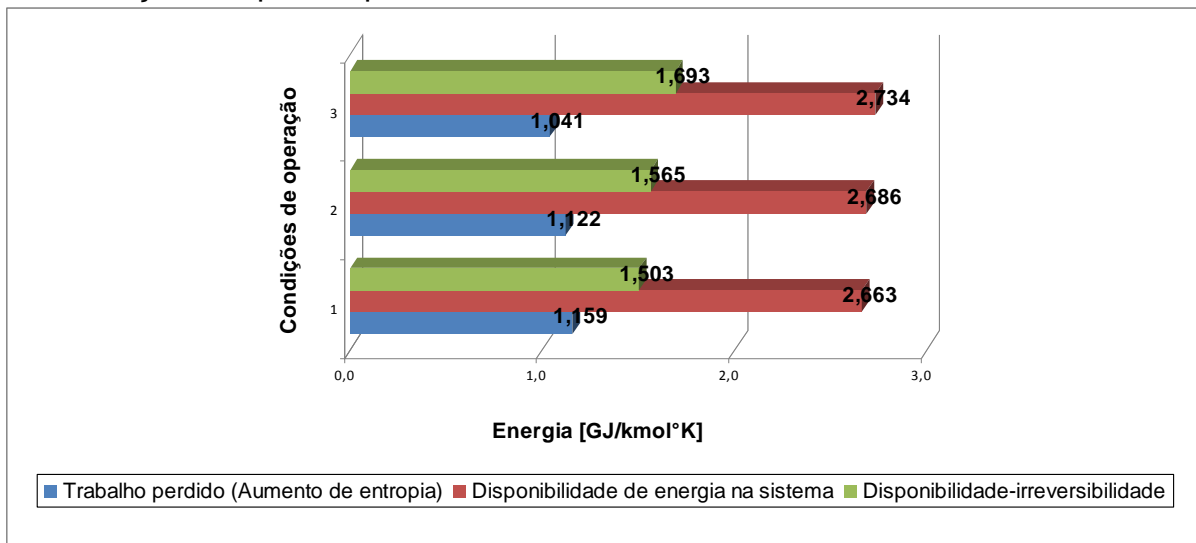


Figura 4: Comparativo de resultados das condições de operação do alto-forno (análise 2).

Quanto ao custo da perda, nota-se também que o mesmo é crescente à medida que se aumenta a taxa de injeção.

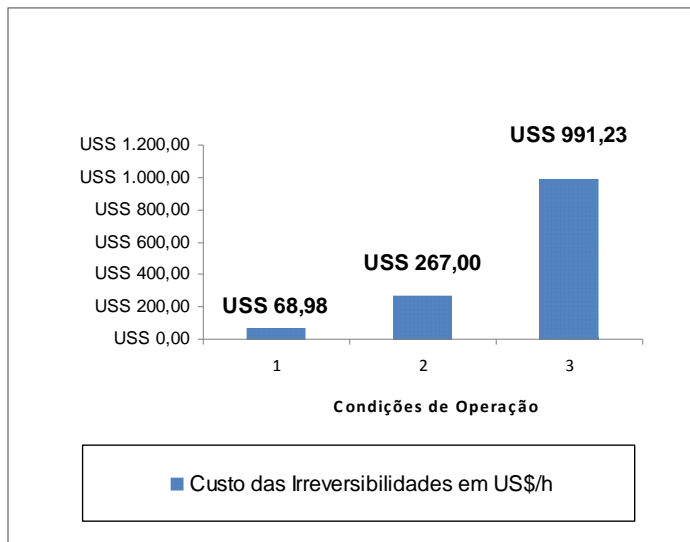


Figura 5: Comparativo dos custos das perdas para as condições de operação do alto-forno (análise 2).

Ao observar as duas situações de análise nota-se o mesmo comportamento, quanto maior a taxa de injeção menor as perdas. Observa-se ainda uma redução dos custos na análise 2, quando essa é comparada a análise 1. Verifica-se que a taxa de perda da análise 1, para cada taxa de injeção em separado, é menor que a 2, conforme mostrado nos gráficos das Figuras 6 e 7.

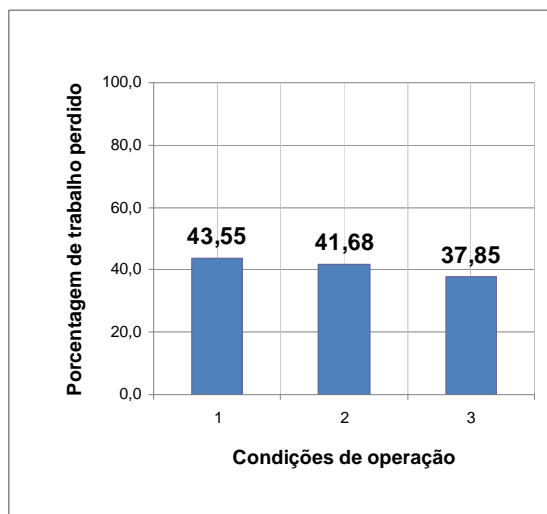


Figura 6: Comparativo da taxa de perda por irreversibilidades para as condições de operação do alto-forno (análise 1).

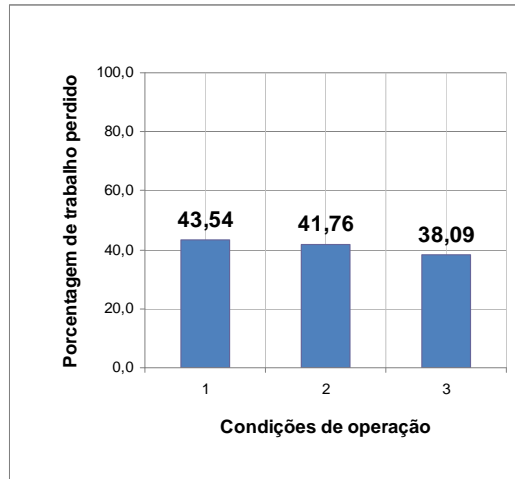


Figura 7: Comparativo da taxa de perda por irreversibilidades para as condições de operação do alto-forno (análise2).

Assis⁽¹⁾ atribui um CMS de 180 US\$/h, TS de 0,9 e CMI de 150 US\$/h, dessa forma, pode-se calcular a economia adicional, para uma perda exergetica mais próxima possível de zero. Utilizando como parâmetros as condições reais de trabalho demonstradas na Tabela 2, pela condição 2, para efeito de ilustração, tem-se a seguinte economia total de energia:

Condição de operação 2, da Tabela 2:

$$E_T = 100.(0.18 * 0,9 - 0.138).158,33$$

$$E_T = 380 \text{ US\$/h}$$

Sendo nessa situação a taxa de perda igual a 41,68% a economia de energia com o balanço exergetico será igual a:

$$E_1 = 380 \times 0,4168 = 158,4 \text{ US\$/h}$$

Portanto, se aliarmos os conceitos da economia adquirida com o uso da injeção de carvão pulverizado com a economia obtida pela diminuição das perdas exergeticas, pode-se chegar a uma economia total de, $E_{Total} = 380 + 158,4 = 538,4 \text{ US\$/h}$.

Executando o mesmos cálculos descritos pelas equações 6 e 7, na situação 1 obtém-se uma economia de:

$$E_{Total} = 272,7 \text{ US\$/h}$$

Já a economia obtida através da situação 3 equivale a:

$$E_{Total} = 1047,60 \text{ US\$/h}$$

Qualquer modificação dos parâmetros, vazão, temperatura, umidade de sopro, taxa de injeção de carvão, umidade e matéria volátil irão alterar a irreversibilidade do sistema. Isso ocorre porque a perda exergetica altera-se em função da quantidade de moles de cada elemento e com a variação da temperatura, entretanto é a disponibilidade de potência e a potência perdida que devem ser ajustadas.

A disponibilidade de potencia é variável em função da quantidade de moles de CO, CO₂, CH₄ e H₂O, que são injetados na ventaneira.

O enriquecimento de oxigênio do ar que diminuirá o trabalho perdido (aumento de entropia) do sistema. A variação da temperatura de sopro, mantendo-se todos os outros parâmetros de controle constantes, não altera a disponibilidade

do sistema, porém com o aumento da temperatura, há uma queda na taxa de geração de perdas irreversíveis.

O aumento do percentual da matéria volátil no carvão, mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, provoca uma redução das perdas por irreversibilidades. Isso pode ser explicado pelo fato de que o aumento da quantidade de CO, CO₂, CH₄ e H₂ presentes na matéria volátil proporcionam uma diminuição do delta de entropia (entropia dos produtos – entropia dos reagentes).

6 CONCLUSÃO

Pode-se concluir:

- a redução da taxa de perdas, advindas de fenômenos irreversíveis na zona de combustão, provoca um aumento da economia proporcionada pela injeção de carvão pulverizado em frente às ventaneiras.
- o ajuste de parâmetros como o enriquecimento do ar soprado em oxigênio, bem como, a temperatura de sopro são ações de uso corrente, que o balanço exergético demonstra serem favoráveis para a redução destas perdas.
- quando se considera as perdas exergéticas no alto-forno, pode-se aumentar a economia no processo de 380 USD para 538,4 USD por hora, ou seja o equivalente a uma economia adicional de 1.196.000 dólares anuais, para uma taxa de 100 kg/t gusa.
- quando se injeta 200 kg/t gusa esta economia pode atingir valores da ordem de 2.485.000 USD anuais.
- finalmente salienta-se que a análise exergética deve ser feita para aperfeiçoar os resultados provenientes da injeção.

Agradecimentos

A Redemat, a FAPEMIG e CNPq que sempre tem auxiliado nas pesquisas do professor Paulo Santos Assis.

REFERÊNCIAS

- 1 ASSIS, P.S.; MARTINS, W.B. Aspectos técnicos relativos a simulação de injeção de materiais diversos em ventaneiras de altos-fornos. In: Congresso nacional de Engenharia Mecânica, CONEM-2002. João Pessoa, Paraíba: agosto de 2002. 12p.
- 2 ASSIS, C.F.C.; Caracterização de carvão vegetal para a sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte. Ouro Preto: REDEMAT,2008.
- 3 BALTAZAR, A. W. S.; CASTRO, J. A.; SILVA, A. J. Modelagem e simulação computacional da injeção de carvão pulverizado no canal adutor da “raceway” de altos fornos. Estudos Tecnológicos, v. 2, n.2, p.65-77, jul-dez. 2006.
- 4 CASTRO,L.F.A.;TAVARES,R.P. Tecnologia de Fabricação de Ferro Gusa em Altos-Fornos. Belo Horizonte: UFMG, 1998. cap.3. p.31-47.
- 5 ASSIS, P.S.;Injeção de Materiais Pulverizados em Altos-Fornos. São Paulo: ABM,2003. cap.1-2
- 6 SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. Introdução à termodinâmica para Engenharia. Rio de Janeiro: LTC, 2003. cap.1 , p.11.



- 7 FAIRES, V. M.; SIMMANG, C. M. Termodinâmica. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1983. cap.1, p. 3.
- 8 ÇENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. Termodinâmica. São Paulo: McGraw-Hill, 2006. cap.2. p. 57.
- 9 SONNTAG, R.E.; BORGNAKKE, C.; WYLEN, G.J.V. Fundamentos da Termodinâmica. São Paulo: Edgard Blücher, 2003. cap. 5, p. 109.
- 10 MACHADO, F.S; ANDRADE, A.M; Propriedades Termoquímicas dos Finos de Carvão Vegetal e de Carvão Mineral, para a Injeção nas Ventaneiras de Altos-Fornos Siderúrgicos. Biomassa e Energia, v. 1, n. 4, p. 353 – 363, 2004.
- 11 MINISTÉRIO DE PLANEJAMENTO ORÇAMENTO E GESTÃO. Disponível em:<<https://conteudoclipingmp.planejamento.gov.br/cadastros/noticias/2010/3/18/usiminas-entra-no-spot-de-carvao>> acesso em: 15 de jun. 2010.