

# ANÁLISE EXERGÉTICA DE UMA USINA SIDERÚRGICA INTEGRADA<sup>1</sup>

Ângela Mara da Silva Cunha<sup>2</sup>  
Ângela Menin Teixeira de Souza<sup>3</sup>  
Geraldo Augusto Campolina França<sup>4</sup>  
Roberto Márcio de Andrade<sup>5</sup>

## Resumo

Este trabalho apresenta uma avaliação das emissões de CO<sub>2</sub> e do desempenho energético de uma usina siderúrgica brasileira integrada a coque de carvão mineral. A avaliação das emissões foi realizada por meio do balanço de massa e a do desempenho foi realizada através de uma análise exergética da siderúrgica. Essas avaliações permitem identificar o real potencial de aumento da eficiência energética da usina e sua situação em relação às emissões de gases de efeito estufa. Os resultados permitem, também, identificar pontos críticos de degradação energética, ou seja, de destruição exergética e as alternativas para eliminá-los ou reduzir suas perdas. É também avaliado o fluxo de carbono, elemento que, além de atuar como redutor no alto-forno, é uma das fontes de energia mais importantes na siderurgia. Além disto, ênfase especial é dada à análise do uso da água, consumida em grande quantidade nos sistemas de refrigeração das usinas siderúrgicas.

**Palavras-chave:** Energia; Exergia; Emissões; Uso de água.

## EXERGY ANALYSIS OF AN INTEGRATED STEEL MILL

### Abstract

This paper presents an evaluation of CO<sub>2</sub> emissions and energy performance of an integrated Brazilian steel mill using coke. The emissions evaluation was carried out through a mass balance and the energy performance was analyzed through an exergy balance of the plant. These evaluations allow the identification of the actual potential for the steel mill energy efficiency improvement and its situation regarding to greenhouse gas emission. Furthermore, the analysis results point out the critical processes of energy degradation, which means exergy destruction, and the alternatives to energy improvement or reduction of losses. The carbon flow is also analyzed. Besides its use as a reduction agent in blast furnaces, carbon is an important energy source in steel production. Finally, water consumption is specially focused since it is a huge input for the refrigeration processes in steel mills systems.

**Key words:** Energy; Exergy; Emissions; Water usage.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 30° Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 24° Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 19 a 21 de agosto de 2009, São Paulo, SP*

<sup>2</sup> *Engenheira mecânica, mestranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Minas Gerais – amscunha@yahoo.com.br*

<sup>3</sup> *Engenheira eletricista, doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais - angelamenin@superig.com.br*

<sup>4</sup> *Engenheiro químico, doutor em Engenharia Mecânica, professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais – franca@demec.ufmg.br*

<sup>5</sup> *Engenheiro mecânico, doutor em Engenharia Mecânica, professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerai – rma@ufmg.br.*

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de fabricação de aço vem sendo objeto de aprimoramento contínuo desde seu início, por volta de 1000 Ac.<sup>(1)</sup>

Nas décadas de 1950 e 1960, começaram a surgir as grandes usinas siderúrgicas integradas no mundo e o Brasil se inseriu nesse processo. A produção nacional de aço passou de 788 mil toneladas ano, em 1950, para 5,5 milhões, em 1970. Segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS,<sup>(2)</sup> no período de abril de 2008 a março de 2009, foram produzidas 30,08 milhões de toneladas de aço bruto no país.

Sendo um processo energo-intensivo, a partir da década de 1980, com a primeira crise do petróleo, o setor deu início a diversos estudos e ações para redução do consumo específico de energia. Mais recentemente, a preocupação com a poluição ambiental e com as emissões de gases de efeito estufa pelo setor industrial, intensificou as ações de redução do uso de recursos naturais e energéticos, principalmente os não renováveis como a água, o carvão mineral e os derivados de petróleo. Além do mais, a competitividade do mercado internacional é mais um fator de pressão pelo produto de qualidade a baixo custo, incluindo o de energéticos.<sup>(3)</sup>

Tradicionalmente, as empresas fazem seus balanços energéticos com base na Lei da Conservação da Energia. A partir da década de noventa, o conceito de exergia passou a ser utilizado com mais intensidade na siderurgia. A exergia é definida como o trabalho máximo que uma dada forma de energia pode realizar, tendo como referência as condições do ambiente.

Os balanços exergéticos possibilitam identificar o potencial de trabalho útil disponível e sua efetiva utilização, bem como a degradação das formas de energia decorrente de irreversibilidades nos processos de transformação energética. Esses balanços permitem avaliar o grau da desordem causada pelos processos industriais e seus resultados são fundamentais para análises de sustentabilidade.

Kotas<sup>(4)</sup> classifica as formas de energia como:

- *Ordenadas:*
  - potencial (gravitacional, elétrica, magnética);
  - cinética (escoamento laminar).

Têm como característica a possibilidade de poderem ser completamente convertidas de uma forma na outra, por meio de processos reversíveis. A energia ordenada, transferida entre dois sistemas, aparece como trabalho nas fronteiras dos sistemas e não como fluxo de calor.

A transferência reversível de energia ordenada ocorre sem modificação na entropia dos sistemas e pode ser analisada pela Primeira Lei da Termodinâmica.

- *Desordenadas:*
  - energia interna;
  - radiação térmica;
  - energia química; e
  - energia de escoamento turbulento.

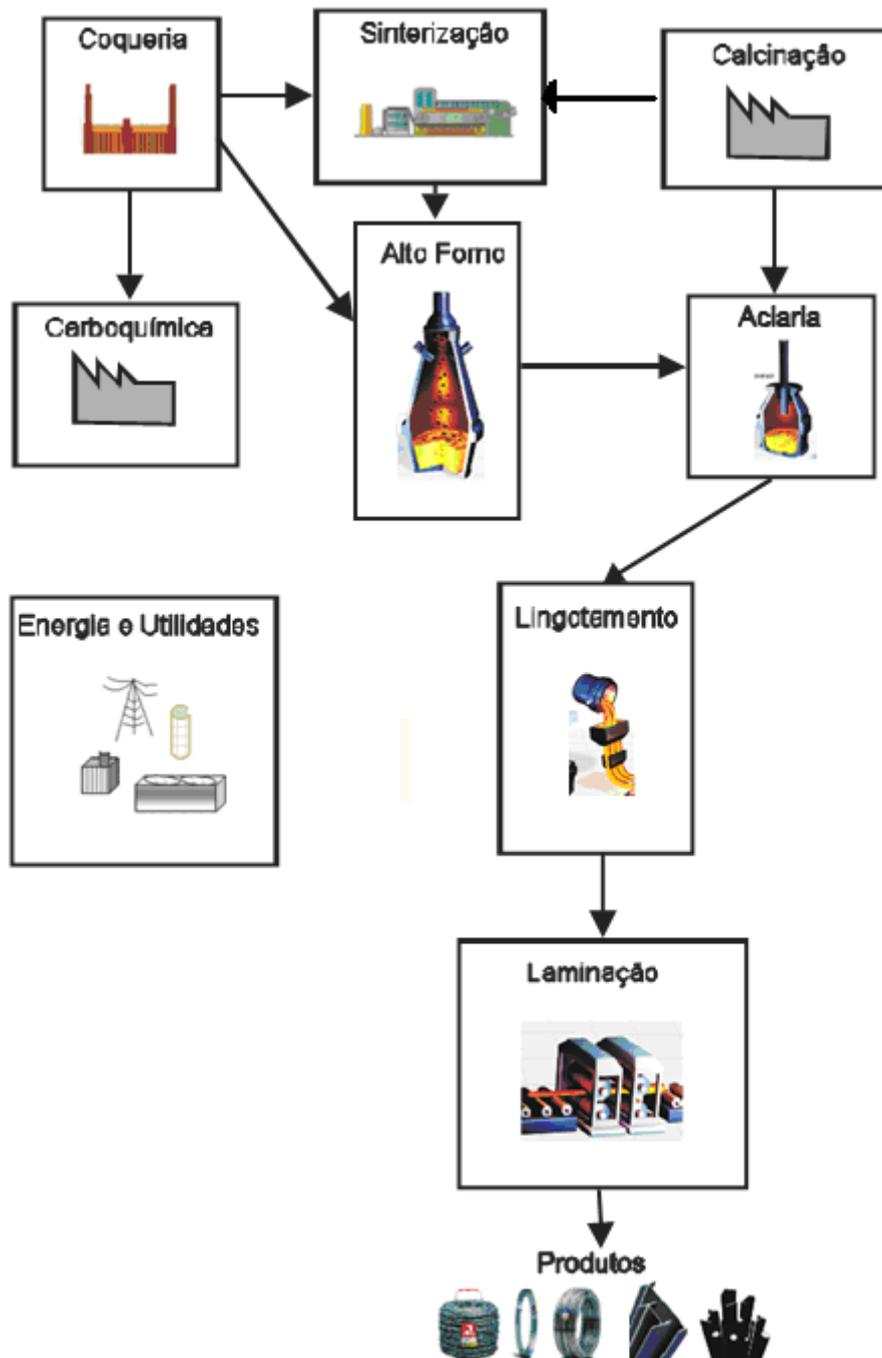
A qualidade das energias desordenadas é caracterizada pela entropia e é, portanto, variável. Depende tanto da forma da energia quanto do agente que a transporta e das condições do ambiente.

O presente trabalho apresenta a avaliação do uso de energia através da metodologia de execução de balanços exergéticos aplicados a uma siderúrgica integrada a coque. O método permite quantificar o real potencial de efficientização da

indústria. Além disto, são elaborados também balanços de massa para a água e para o carbono utilizados na indústria.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O processo industrial analisado é composto pelas etapas convencionais, representadas na Figura 1.



**Figura 1.** Processo siderúrgico integrado a coque.<sup>(5)</sup>

No presente estudo, a unidade carboquímica foi excluída, pois, além de não participar diretamente da cadeia produtiva do aço, apresenta produção complexa e variável de diversos compostos químicos.

As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, os insumos e produtos de cada etapa produtiva.

**Tabela 1.** Insumos e matérias-primas do processo siderúrgico considerado

<b>Etapa</b>	<b>Insumos</b>	<b>Etapa</b>	<b>Insumos</b>
<b>sinterização</b>	coque, fundentes, aglomerantes, elementos de liga, água, N <sub>2</sub> , energia elétrica	<b>laminação de perfis</b>	lingotes, gás natural, gás de coqueria, gás de alto-forno, energia elétrica, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , vapor de baixa pressão, água.
<b>coqueria</b>	carvão, vapor, água, N <sub>2</sub> , energia elétrica, gás de coqueria, gás de alto-forno	<b>laminação de fio máquina</b>	lingotes, gás de coqueria, gás de alto-forno, energia elétrica, N <sub>2</sub> , água.
<b>alto-forno</b>	carvão, coque, sínter, ar de processo, vapor, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , gás de coqueria, gás de alto-forno, energia elétrica, água	<b>laminação de placas, blocos e tarugos</b>	lingotes, gás de coqueria, gás de alto-forno, energia elétrica, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , vapor de baixa pressão, água.
<b>aciaria</b>	ferro gusa, sucata de ferro, cal, minérios, argônio, N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , ligas, gás de coqueria, gás natural, energia elétrica, água, vapor .	<b>calcinação</b>	calcário, água, energia elétrica, gás de coqueria
<b>lingotamento</b>	aço líquido, argônio, O <sub>2</sub> , água, energia elétrica, gás de coqueria, gás natural	<b>sistema de energia</b>	energia elétrica, gás de aciaria, gás natural, gás de alto-forno, argônio, água; condensado de vapor, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , ar, ar soprado
<b>carboquímica</b>	gás de coqueria, vapor, energia elétrica, N <sub>2</sub> , água		

**Tabela 2.** Produtos e efluentes do processo siderúrgico considerado

<b>Etapa</b>	<b>Produtos e Efluentes</b>	<b>Etapa</b>	<b>Produtos e Efluentes</b>
<b>sinterização</b>	sínter, gases de combustão	<b>laminação de perfis</b>	perfis, gases de combustão, água
<b>coqueria</b>	coque, finos de carvão, alcatrão, resíduos de alcatrão, gás de coqueria, óleo leve	<b>laminação de fio máquina</b>	fio máquina, gases de combustão, água
<b>alto-forno</b>	ferro gusa, lama, escória, gás de alto-forno, energia elétrica	<b>laminação de placas, blocos e tarugos</b>	placas, blocos, tarugos, gases de combustão, água
<b>aciaria</b>	aço líquido, gases de combustão, gás de aciaria, lama, escória, água	<b>calcinação</b>	cal, CO <sub>2</sub> , gases de combustão
<b>lingotamento</b>	tarugos, gases de combustão, água	<b>sistema de energia</b>	energia elétrica, vapor de alta pressão, vapor saturado, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , argônio, ar soprado, água industrial, água potável
<b>carboquímica</b>	benzeno, tolueno, xileno, óleol, amônia, piche, naftaleno, óleo creosoto, óleo antracênico, CQI, óleo de alcatrão, água		

As Tabelas de 3 a 5 apresentam, respectivamente, as composições do minério de ferro e sínter, dos gases combustíveis e do coque de petróleo e alcatrão.

**Tabela 3.** Composição do carvão mineral e do sínter

<b>Componente</b>	<b>Participação (%)</b>
<b>Minério de ferro</b>	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	82,85
FeO	1,24
SiO <sub>2</sub>	3,76
MnO	0,36
H <sub>2</sub> O	9,00
<b>Sínter</b>	
minério de ferro	90,76
CaO	7,26
Carvão	1,90

**Tabela 4.** Composição dos gases combustíveis

Componente	Participação volumétrica (%)			
	GAF	GAC	GCO	GN
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,11	0,00
CO <sub>2</sub>	24,50	18,69	1,90	0,47
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,00	0,00	0,69	5,64
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,00	0,00	2,08	0,00
H <sub>2</sub>	3,83	0,85	60,20	0,00
CH <sub>4</sub>	0,00	0,00	26,02	92,10
CO	24,10	56,63	6,13	0,00
N <sub>2</sub>	46,70	23,37	2,00	0,78
O <sub>2</sub>	0,87	0,46	0,87	0,01
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-	-	-	1,00
TOTAL	100,00	100,00	100,00	100,00

**Tabela 5.** Composição do coque de petróleo e do alcatrão

Componente	teor (%)	
	Coque	Alcatrão
carbono	86,31	80,28
hidrogênio	3,60	8,52
oxigênio	1,60	8,52
nitrogênio	1,77	2,00
enxofre	5,50	0,69
outros	1,22	-

Desconsiderando acúmulo de massa e de energia na usina, o balanço exergetico em um volume de controle da usina é dado por:

$$\dot{E}_e + \dot{E}^Q = \dot{E}_s + \dot{W}_x + \dot{I}$$

onde:

$$\dot{E}^Q = \sum_r \left[ \dot{Q}_r \frac{T_r - T_0}{T_r} \right] \text{ é o fluxo de exergia devido à troca térmica,}$$

$$\dot{E}_e = \sum_e \dot{m} \varepsilon \quad \text{e} \quad \dot{E}_s = \sum_s \dot{m} \varepsilon \quad \text{são as exergias associadas aos fluxos de entrada(e) e}$$

de saída(s) do volume de controle.

$$\varepsilon = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0) + \frac{V_0^2}{2} + gz_0 \quad \text{é a exergia específica da substância.}$$

Nas equações acima:

$s$  é a entropia;

$h$  é a entalpia;

$\dot{Q}_r$  é a taxa de transferência de calor entre o volume de controle e um reservatório térmico;

$\dot{m}$  é a vazão mássica;

$T$  é a temperatura;

$r$  refere-se a um reservatório térmico;

$0$  refere-se ao ambiente;

$\dot{W}_x$  é a potência mecânica realizada pelo volume;

$\dot{I}$  é a taxa de irreversibilidade.

A exergia específica tem um componente de exergia potencial, um de exergia cinética, um de exergia física e um de exergia química. No caso em estudo, os componentes de exergia cinética,  $\varepsilon_K = \frac{V_0^2}{2}$ , e potencial,  $\varepsilon_P = gz_0$ , são nulos ou desprezíveis. Os fluxos de massa considerados correspondem ao total anual, tendo como base o ano de 2007.

As exergias químicas dos elementos e substâncias são disponíveis na literatura<sup>(4,6)</sup>. Para mistura de gases tem-se a exergia química molar:

$$\tilde{\varepsilon}_{0,M} = \sum_i x_i \tilde{\varepsilon}_{0,i} + \tilde{R}T_0 \sum_i x_i \ln x_i$$

**onde:**  $x_i$  é a fração volumétrica do i-ésimo componente e  $\tilde{\varepsilon}_{0,i}$  é sua exergia química molar.  $R$  é a constante universal dos gases.

Para cálculo da exergia química do carvão e do coque de petróleo, foi usada a formulação empírica proposta por Szargut<sup>(6)</sup>:

$$\varepsilon_{o,c} = (PCI_c + h_{lv})\beta + (\varepsilon_{0,s} - PCI_s)z_s + \varepsilon_{0,h2o}z_{h2o}$$

**onde:**  $PCI$  é o poder calorífico inferior do carvão ou coque;

$h_{lv}$  é o calor latente de vaporização da água;

$z$  é o teor do componente;

e  $\beta$  é dado por

$$\beta = 1,0437 + 0,1896 \frac{z_{h2o}}{z_c} + 0,0617 \frac{z_{o2}}{z_c} + 0,0428 \frac{z_{n2}}{z_c}$$

Para o termo  $(\varepsilon_{0,s} - PCI_s)$ , foi adotado o valor padrão de 9.535,46 kJ/kg. Formulação semelhante foi utilizada para cálculo da exergia química do alcatrão:

$$\beta = 1,0401 + 0,1728 \frac{z_{h2}}{z_c} + 0,0432 \frac{z_{o2}}{z_c} + 0,2169 \frac{z_s}{z_c} (1 - 2,0628 \frac{z_{h2}}{z_c})$$

Com os materiais usados ou produzidos na indústria de referência, as exergias químicas obtidas foram de 30.485 kJ/kg para o carvão, 33.996 kJ/kg para o coque de petróleo e 40.150 kJ/kg para o alcatrão.

As exergias físicas são calculadas por:

$$\dot{\varepsilon}_{ph} = (h_1 - h_2) - T_0 (s_1 - s_2)$$

As exergias físicas dos gases<sup>(4)</sup> são obtidas pela equação:

$$(\tilde{\varepsilon}_{ph})_M = (T - T_0) \sum_{i=1}^N x_i \tilde{c}_{P,i}^\varepsilon + \tilde{R}T_0 \ln(P/P_0), \text{ onde:}$$

$T$  é a temperatura da mistura;

$P$  é a pressão total do gás;

$N$  é o número de componentes.

Os valores de  $\tilde{c}_P^\varepsilon$  estão tabulados em KOTAS<sup>(4)</sup> para alguns gases. Aqueles não disponíveis podem ser obtidos por meio da equação:

$$\tilde{c}_P^\varepsilon = \frac{1}{T - T_0} \left[ \int_{T_0}^T \tilde{c}_P dT - T_0 \int_{T_0}^T \frac{\tilde{c}_P dT}{T} \right] \text{ que é a capacidade exergética isobárica molar média.}$$

Os valores das propriedades termodinâmicas dos diversos materiais e elementos envolvidos no processo foram obtidos através da biblioteca da NASA disponível no programa Engineering Equation Solver – EES<sup>(7)</sup>.

Para os cálculos dos fluxos de exergia, foi considerado que a combustão dos gases é completa, sendo a queima realizada com teores de excesso de ar entre 1,5% e 6%, dependendo do setor da indústria.

### 3 RESULTADOS

Os fluxos de exergia na unidade industrial estão detalhados nas Tabelas 6 e 7. Os resultados são apresentados em Gigajoules por tonelada de gusa produzida no alto-forno. Pode ser visto que a relação entre a exergia total fornecida ao processo e aquela agregada aos produtos (aço, carepa e alcatrão) é de 0,373, ou seja, 62,7% da exergia suprida são destruídos no processo.

**Tabela 6 –Exergias de entrada**

Insumos e matérias primas	GJ/t gusa
Minério de Ferro	0,25
Calcário	0,41
Carvão	17,98
Outros sólidos	0,68
coque de petróleo	0,91
ar de processo	0,26
água industrial	0,45
energia elétrica	0,57
gases	0,04
<b>total</b>	<b>21,55</b>

**Tabela 7. Exergias de saída**

Produtos e subprodutos	GJ/t gusa
alcatrão	0,65
aço e carepa	7,22
energia elétrica para a carboquímica	0,02
gases (Ar, N <sub>2</sub> )	0,02
GCO para carboquímica	0,12
<b>subtotal</b>	<b>8,03</b>
<b>Resíduos, efluentes líquidos e gasosos e perdas externas</b>	
escória da aciaria	0,42
lama da aciaria	0,13
escória do alto-forno	0,36
lama do alto-forno	0,02
perdas de água nas torres	0,34
perda de água no circuito fechado	0,06
perda de água no circuito aberto	0,02
vapor p/ áreas industriais	0,02
vapor 12 kgf/cm <sup>2</sup> para a carboquímica	0,02
vapor 25 kgf/cm <sup>2</sup> para a carboquímica	0,01
vapor de extinção do coque	0,28
produtos da combustão	1,21
CO <sub>2</sub> da calcinação	3,52
<b>subtotal</b>	<b>6,41</b>
<b>Perdas internas</b>	<b>7,09</b>
<b>total</b>	<b>21,53</b>

Deve ser observado que os gases combustíveis gerados nos processos são consumidos internamente em sua totalidade. Pequena quantidade de gás de coqueria é enviada para a carboquímica. A maior parte da exergia desses gases é, portanto, gasta nas etapas produtivas, sendo o restante perdido para a atmosfera através dos gases produzidos na combustão.

A água consumida na usina é usada, principalmente, nos processos de resfriamento em circuitos abertos e fechados e na produção de vapor para uso industrial e para a geração de energia elétrica. A indústria consome 9,78 kg de água por kg de ferro gusa produzido, assim distribuídos:

- água para o sistema de vapor: 0,22 kg/kg gusa
- água potável: 0,86 kg/kg gusa
- água para os setores da usina: 8,70 kg/kg gusa

A distribuição do consumo de água industrial foi:

- extinção do coque: 0,52 kg/kg gusa
- perdas de água líquida na usina: 1,08 kg/kg gusa
- perdas de água nas torres de refrigeração: 6,71 kg/kg gusa
- água de refrigeração em circuito aberto : 0,39 kg/kg gusa

Dada a importância energética e ambiental do carbono, ao lado da necessidade de seu uso como agente redutor no alto-forno, é importante monitorar todo o seu fluxo, como ferramenta auxiliar para otimizar o seu uso. O balanço de carbono é apresentado na Tabela 8.

**Tabela 8.** Balanço de carbono

kg carbono / t gusa		
Entrada de Carbono	coque de petróleo	23,5
	calcário	40,0
	carvão	402,0
	ligas e fundentes	4,5
	<b>total</b>	<b>470,0</b>
Saídas de Carbono	gases combustíveis	420,0
	alcatrão	12,2
	aço e carepa	0,3
	CO <sub>2</sub> da calcinação	37,5
	<b>total</b>	<b>470,0</b>

#### 4 DISCUSSÃO

De acordo com os dados apresentados nas Tabelas 6 e 7, verifica-se que a diferença entre a exergia de entrada e de saída através dos produtos e subprodutos da usina é de 13,5 GJ/t de gusa. Este valor representa, portanto, a destruição específica de exergia no processo industrial.

Estudo realizado por Beer et Blok<sup>(9)</sup> aponta para um valor futuro, com uso de técnicas de recuperação de calor, da ordem de 10 GJ/t de aço bruto. O autor calcula que a demanda energética teórica nos processos de fusão e redução no alto-forno seja de 6,8 GJ/t de ferro. Para uma usina integrada teórica, com tecnologia produtiva da década de 80, foi calculado que do suprimento de 22,6 GJ/t de aço bruto, somente 10,9 GJ/t são incorporados a produtos úteis. No caso, além do aço, foram considerados úteis o alcatrão, benzeno, finos de coque, vapor e gases combustíveis exportados pela usina.

Em um trabalho realizado em 2004 e aplicado a altos-fornos de pequeno porte,<sup>(10)</sup> o fornecimento de exergia ao forno foi calculado em 16,15 GJ/t de gusa,

dos quais 8,12GJ/t são incorporados ao metal. Já no estudo apresentado em 2005 por Ostrovski e Zhang,<sup>(11)</sup> a entrada total de exergia no alto-forno foi calculada em 27,66 GJ/t para uma saída de 8,96 GJ/t de metal líquido.

A diferença principal entre os dados dos diversos trabalhos apresentados está nas cargas de carvão, principal responsável pela entrada de exergia no processo.

Akyiama e Yagi<sup>(12)</sup> estudaram o limite teórico da redução de emissão de CO<sub>2</sub> na produção convencional de gusa em alto-forno a carvão. A demanda teórica por carbono é de 361 kg/t de gusa, quando não há ganga no minério e cinza no carvão.

A Tabela 6 mostra que o carvão é o maior responsável pela exergia introduzida na indústria. Ressalta-se que, apesar da importância do carbono no processo produtivo, dos 470 quilos por tonelada de gusa utilizados apenas 0,3 quilos são fixados no aço.

A partir da assinatura do Protocolo de Quioto, ratificado pelo Brasil, os países inseridos no Anexo 1 daquele documento<sup>(8)</sup> passaram a ter metas de redução de emissão de gases de efeito estufa, dentre os quais se insere o CO<sub>2</sub>. Apesar de o Brasil não fazer parte deste grupo, pode receber os chamados Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL, destinados a promover a redução das emissões. Esses projetos podem ser realizados por interesse de uma empresa estrangeira ou podem gerar créditos de carbono a serem negociados no mercado internacional.

Como requisito para a apresentação de um projeto de MDL, deve ser estabelecido e aprovado um cenário básico de emissões, correspondente ao panorama que ocorreria na ausência do projeto. Esses cenários são denominados *Linhas de Base*. Até a presente data, não se encontra disponível um cenário que possa ser aplicado genericamente ao processo siderúrgico integrado. Os dados obtidos com os balanços realizados são necessários ao estabelecimento futuro do cenário básico da indústria estudada.

Já com relação ao uso da água industrial, pode ser visto que mais de 68% da demanda decorre da reposição da água perdida nas torres dos circuitos de refrigeração. Apesar de o consumo específico de água da unidade industrial e do índice de recirculação de 95% estarem compatíveis com os de outras plantas brasileiras<sup>(5)</sup>, cálculos preliminares da vazão de água necessária à redução de temperatura nas torres mostram que cerca de 40% da água perdida nas torres é removida por arraste mecânico. É possível ainda reduzir o consumo de água com o aumento do índice de recirculação e pela adoção de tecnologia de extinção de coque através de gases inertes.

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos balanços realizados e por comparação com a literatura, conclui-se que há potencial de aumento da eficiência exérgica da siderúrgica integrada estudada. Considerando os valores apontados por Beer e Blok<sup>(9)</sup>, a demanda exérgica da usina tem um potencial de redução de 35%. Este potencial, com relação aos cálculos de Akyiama e Yagi<sup>(12)</sup> é ainda maior, entre 50 e 64%.

O aumento de eficiência exérgica significa não só redução de consumo energético e de custos operacionais, como também menor desorganização do meio ambiente, ou seja, maior sustentabilidade. Dentre as proposições visando aumento de eficiência exérgica podem ser destacadas:

- Busca da eliminação de etapas de resfriamento seguidas de aquecimentos, quando possível, principalmente no lingotamento e na laminação.

- Aproveitamento de calores residuais para pré-aquecimentos.
- Otimização dos processos de combustão para melhor aproveitamento da energia liberada nesses processos.
- Aproveitamento da energia disponível nos vapores gerados em diversos processos de resfriamento.

Ressalta-se o reaproveitamento total, por essa planta, dos gases combustíveis gerados durante as diversas etapas do processo de produção do aço.

Concluindo, é sugerido que sejam analisadas medidas para redução do uso da água, tais como:

- Estudo de tecnologias alternativas para resfriamento e para extinção de coque.
- Adoção de medidas de otimização das torres de refrigeração.

## REFERÊNCIAS

- 1 Mourão, M.B., Yokoji, A., Malynowskyj, A., Leandro, C.A.S., Takano, C., Quites, E.M.C., Gentile, E.F., Silva, G.F.B.L., Bolota, J.R., Gonçalves, M., Faco, R.J. Introdução à Siderurgia, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2007.
- 2 Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS, Produção Siderúrgica Brasileira, [http://www.ibs.org.br/estatisticas/estatisticas\\_marco\\_2009.htm](http://www.ibs.org.br/estatisticas/estatisticas_marco_2009.htm), acesso em 23 de abril de 2009.
- 3 IWWR - Illinois Waste Management and Research Center, 2007, Primary Metals, 30 de maio de 2008, <[http://www.wmrc.uiuc.edu/info/library\\_docs/manuals/primmetals/chapter2.htm](http://www.wmrc.uiuc.edu/info/library_docs/manuals/primmetals/chapter2.htm)>, acesso em junho de 2008.
- 4 Kotas, T.J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, USA, 1995.
- 5 ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Balanço Energético Global em 2006, XXVIII Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades, Vitória, Espírito Santo, Brasil, 2007.
- 6 Szargut, J., Morris, D. R.; Steward F. R. Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes, Hemisphere Publishing Corporation, 1988.
- 7 Klein, S. A. Engineering Equation Solver – EES, Academic Professional V8.192, F-Chart Software, USA, 1992-2008.
- 8 Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE, Manual de Capacitação sobre Mudança do Clima e Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), Brasília, DF, 2008.
- 9 Beer, J; Worrell, E., Blok, K. Future Technologies for Energy-Efficient Iron and Steel Making, . Annual Review of Environment and Resources, Palo Alto, USA, n. 23, pp.123–205, 1998.
- 10 Nogami, H.; Yagi, J.; Sampaio, R.S. Exergy Analysis of Charcoal Operation of Blast Furnace, ISIJ International, vol.44(2004), N°10, pp.1646 – 1652, 21 de junho de 2004.
- 11 Akiyama, T.; Yagi J. Methodology to Evaluate Reduction Limit of Carbon Dioxide Emission Exergy Minimum Consumption for Ironmaking, ISIJ International, Vol. 38, No. 8, pp. 896-903, 1998.
- 12 Ostrovski, O.; Zhang, G. Energy and exergy analyses of direct ironsmelting processes, Energy, n. 30 pp 2772–2783, 2005.
- 13 Campos, J. C. V.; Sousa, C. B. M. Turbina de Topo do Alto Forno 03, Usiminas, Seminário de Eficiência Energética da Cemig, Belo Horizonte, 2005.