

Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade

Pedro Sérgio Landim de Carvalho
Pedro Paulo Dias Mesquita
Elizio Damião G. de Araújo*

Resumo

O presente artigo busca analisar a sustentabilidade da siderurgia brasileira, com foco em parâmetros de eficiência de produção e competitividade. Comparativamente, são apresentados parâmetros de sustentabilidade brasileiros e internacionais, bem como um quadro atual da indústria sobre a eficiência energética, abrangendo programas de redução de consumo energético e emissões, além de dados de autoprodução de energia da siderurgia brasileira. São realizadas análises de eficiência e competitividade por rotas e etapas de produção, com destaque para a eficiência e o consumo de energia, principal fonte de emissões das usinas siderúrgicas. As análises contemplam a identificação da posição relativa da indústria brasileira quanto ao consumo dos principais insumos, buscando identificar os países produtores mais eficientes em cada etapa de produção. Por fim, apresentam-se as principais tecnologias e processos promotores de eficiência energética e redução de emissões, bem como oportunidades e perspectivas de apoio à adoção dessas tecnologias por indústrias menos avançadas.

* Respectivamente, gerente, economista e engenheiro do Departamento de Indústria de Base da Área de Insumos Básicos do BNDES.

A indústria siderúrgica: principais segmentos e produtos

A indústria siderúrgica é importante fornecedora de insumos para produtos de diversas indústrias e para a construção civil. É formada por grandes empresas, em geral verticalizadas, que operam as diversas fases do processo produtivo, da transformação do minério em ferro primário (gusa ou ferro-esponja) à produção de bobinas laminadas a quente, a frio ou galvanizadas, para aplicação em produtos na indústria automotiva, de bens de capital, naval, de linha branca, entre outras. Os laminados longos, também produtos siderúrgicos, cujo principal exemplo é o vergalhão, são muito usados nos setores de habitação e infraestrutura. Cabe destacar outro segmento importante da indústria siderúrgica: a produção de tubos de aço, que podem ser com costura ou sem costura.

Por ser uma indústria intensiva em capital, necessita de investimentos em ativos destinados a projetos de longo prazo de maturação, que implicam elevado aporte de recursos e fortes barreiras à entrada.

A indústria siderúrgica brasileira consegue atender à quase totalidade da demanda do mercado doméstico, produzindo uma ampla gama de produtos de aços planos e longos. A maior parte da produção siderúrgica nacional é de aço carbono comum. Vale observar que todos os produtos fabricados em aço carbono também podem ser produzidos em aço especial ou ligado. No entanto, pela complexidade dos processos de elaboração dos aços especiais e pelo valor intrínseco dos chamados elementos de liga (níquel, cromo, cobalto, nióbio, vanádio, entre outros), geralmente são produzidos em pequenos volumes e têm aplicações específicas.

Rotas tecnológicas e principais processos de produção do aço

O aço é uma liga metálica ferro-carbono em que o ferro participa pelo menos com 98% e o carbono com até 2%. Entre outras propriedades, apresenta resistência mecânica, maleabilidade e ductilidade, principais características necessárias às suas diversas aplicações na engenharia estrutural.

O processo de produção do aço pode ser dividido em três etapas básicas:

1. redução, em que o minério de ferro é transformado em ferro metálico (gusa ou ferro-esponja);

2. refino, em que são retiradas as impurezas da liga metálica e reduzido o teor de carbono, etapa na qual se obtém o aço propriamente dito; e
3. conformação mecânica, na qual o produto semiacabado, resultado da solidificação do aço (lingotamento), é laminado na forma desejada: chapas, barras, fios, tubos etc.

A divisão do processo produtivo nessas três etapas permite, ainda, uma classificação da siderurgia em dois segmentos: (i) as usinas integradas, que executam as três etapas citadas, procedendo à redução do minério de ferro através do coque, do carvão vegetal ou do gás natural; e (ii) as semi-integradas, em que o aço é obtido através da fusão/refino da carga metálica, composta de sucata e ferro-gusa ou ferro-esponja.

A seguir, apresentam-se, de forma sumariada, as três etapas básicas de produção do aço.

Redução do minério de ferro

O processo de redução consiste na transformação do minério de ferro, geralmente na forma de um óxido de ferro, em uma liga metálica de ferro-carbono, a partir do uso de um agente redutor – no caso, o elemento carbono. Do processo de redução, obtém-se o chamado ferro primário ou ferro de primeira fusão (liga de ferro e carbono).

A obtenção do ferro primário ou ferro reduzido pode ser feita por meio de diversas rotas tecnológicas. As mais comumente utilizadas são:

1. redução do minério (na forma de granulado, de sinter ou de pelota) em altos-fornos, com uso do coque de carvão mineral como agente termorredutor, tendo como produto o ferro-gusa líquido, que é transportado à aciaria, unidade na qual é transformado em aço, no caso de uma unidade integrada a coque;
2. redução do minério (na forma de sinter ou pelota) a partir do carvão vegetal como termorredutor, em fornos menores, tendo como produto o ferro-gusa líquido, que pode ou não ser solidificado na forma de pão de gusa, para ser usado em etapa posterior, na produção do aço, geralmente em fornos elétricos;
3. produção de ferro-esponja (ferro primário sólido), a partir do minério na forma de pelotas ou granulado, com uso de gás reformado como

agente redutor (em geral, obtido a partir do gás natural), no processo conhecido como redução direta, cuja tecnologia mais usada é a Midrex;¹

4. produção de ferro primário através de fusão redutora, cuja tecnologia mais usada é a Corex (*vide* nota 1).

Em unidades integradas a coque – rota mais utilizada mundialmente na produção de aço –, o minério de ferro, o coque e os fundentes são carregados pelo topo, no alto-forno, enquanto pelas ventaneiras, localizadas na base do forno, é injetado ar quente, dando início ao processo de fusão da carga sólida. A temperatura nos alto-fornos varia de 1.000°C no topo a 1.500°C na base. A combinação do carbono do coque com o oxigênio do minério libera o calor necessário para fundir o metal. Na base do alto-forno, vai se depositando o ferro-gusa, que, depois, é retirado e levado aos conversores para seu refino.

O ferro primário obtido nessa etapa segue para o processo de refino, no qual se obtém o aço propriamente dito.

Cabe observar que, no Brasil, de acordo com a configuração técnica das usinas, a produção de aço apresenta forte concentração em unidades integradas a coque, chegando a representar 80,3% da produção em 2013.

Outro ponto importante é que, no Brasil, a produção de aço através do uso de conversores a oxigênio (LD/BOF – Basic Oxygen Furnace), que será detalhada a seguir, representa boa parcela da produção, chegando a ter participação de 73,3%, entre os processos de aciaria, em 2013. Nesse mesmo ano, em todo o mundo, a participação dos conversores LD/BOF chegou a 71,7% do total de produção de aço bruto.

Refino (aciaria)

Trata-se da etapa em que o ferro primário é convertido em aço líquido. Utiliza-se o chamado refino secundário ou metalurgia de panela quando se deseja conferir ao aço características mais nobres, seja pela adição de elementos de liga, seja pela utilização de atmosferas controladas para tratamento do aço líquido.

¹ A tecnologia Midrex baseia-se na redução direta do minério de ferro pela passagem de um gás redutor em contracorrente ao fluxo descendente da carga ferrífera (granulados e pelotas). O processo Corex tem dois estágios básicos: em um primeiro reator, realiza-se a redução quase total do minério de ferro em estado sólido. Nesse reator, o material obtido é carregado para um segundo reator, onde é fundido para completar o processo de redução. A energia empregada nesse processo é fornecida pela queima do carvão mineral do segundo reator.

Basicamente, existem três processos de produção de aço líquido, caracterizados pelo emprego de diferentes fornos de refino: o conversor a oxigênio (LD/BOF), o forno elétrico a arco (EAF – Electric Arc Furnace) e o forno Siemens-Martin (OH – Open Heart).

O processo Siemens-Martin está praticamente em desuso por causa de sua baixa produtividade e ao alto potencial poluidor, razão pela qual não será objeto de detalhamento neste artigo. Atualmente, tal processo é utilizado apenas na Ucrânia e na Rússia.

Conversor a oxigênio (LD/BOF)

O processo de refino do aço em conversores a oxigênio (processo LD/BOF) tem por objetivo reduzir os teores de carbono do ferro-gusa, na fase líquida, através de injeção de oxigênio com lanças de sopro. Nessa fase, também ocorre redução dos teores de outros elementos, como silício, enxofre e fósforo.

Forno elétrico a arco (EAF – Electric Arc Furnace)

O processo de produção do aço em forno elétrico (EAF) consiste na fusão de sucata de aço e de ferro primário (gusa ou ferro-esponja) a partir do calor gerado por um arco elétrico formado entre eletrodos de grafita ou entre os eletrodos e a carga metálica.

Depois da fusão da carga, injeta-se oxigênio por meio de uma lança, a fim de promover a reação de oxidação de carbono, silício e fósforo, visando à redução desses elementos.

A transformação de gusa em aço, tanto nos conversores como nos fornos elétricos, sempre libera monóxido (CO) e dióxido de carbono (CO₂).

Após a obtenção do aço líquido, ocorre a solidificação, a partir de processo de lingotamento, a fim de seguir para a etapa de conformação do material através da laminação.

Conformação (laminação)

A laminação é o processo metalúrgico de conformação mecânica mais utilizado. Consiste na passagem do material semiacabado (placa ou barra) entre dois cilindros, visando à diminuição da espessura da placa/barra, que

ocorre por meio das forças de atrito entre o semiacabado e os cilindros de laminação. Antes de passar pelos cilindros, o material é levado ao forno de reaquecimento para que fique ao rubro, ou seja, dúctil o suficiente para que possa ser laminado até se obterem espessuras muito finas.

Por meio da laminação, são obtidos produtos acabados, que tanto podem ser planos (chapas grossas, chapas e folhas laminadas a quente e a frio) quanto longos (fio-máquina, vergalhões, perfis, tubos). Em geral, os laminados planos a quente e a frio são apresentados na forma de bobinas.

A seguir, as figuras apresentam, de forma esquemática, os fluxos simplificados das duas rotas mais empregadas na produção de aço:

Figura 1 | Principais rotas de produção de aço

Figura 1a | Rota de produção em unidades integradas a coque (alto-forno e LD/BOF)

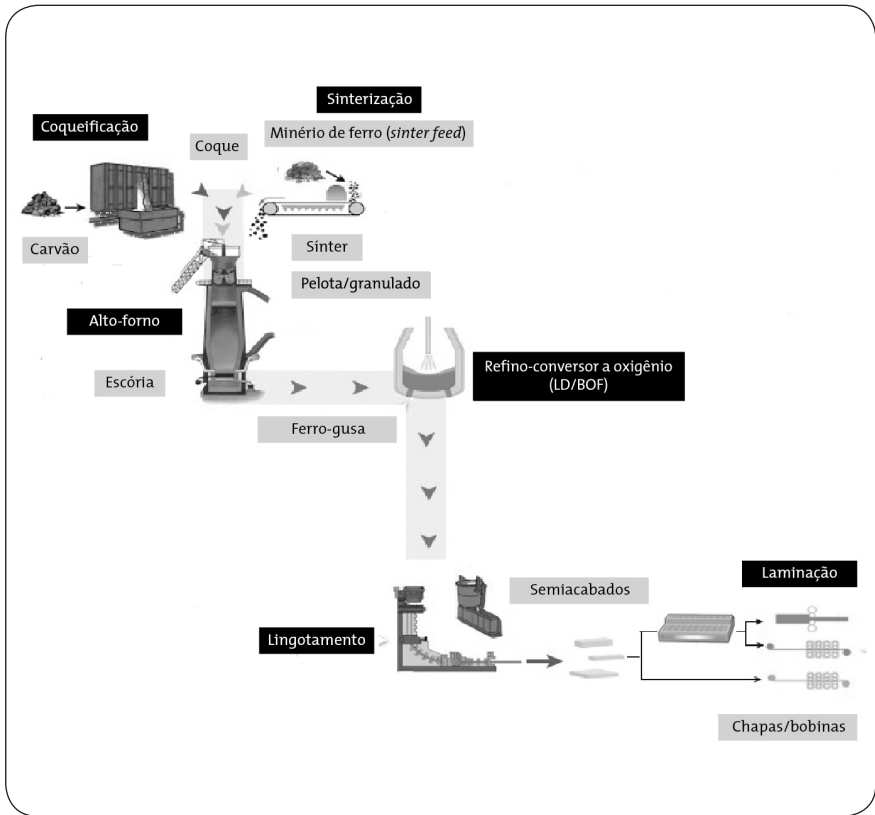
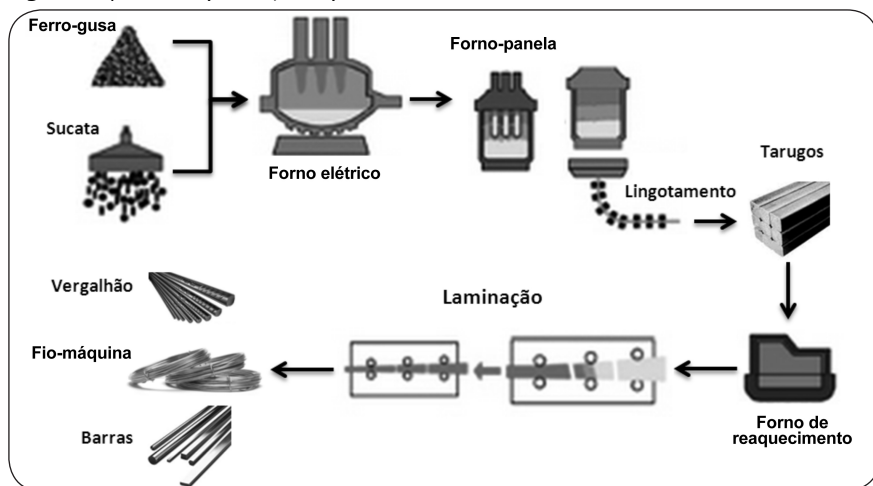


Figura 1b | Rota de produção a partir de aciaria elétrica (EAF)

Fonte: Elaboração própria.

Aspectos ambientais

A indústria siderúrgica é grande consumidora de energia e de materiais e, como tal, também responsável por considerável volume de efluentes, dada a grande quantidade de reações físico-químicas envolvidas nas diversas etapas do processo de fabricação do aço. Assim, para a transformação do minério de ferro em produto laminado de aço, passando pelas etapas de coqueificação, sinterização, redução e refino, são produzidos grandes volumes de emissões gasosas, efluentes líquidos e resíduos sólidos. A partir da década de 1980, por pressão da sociedade e da legislação pertinente, a indústria tem-se tornado mais eficiente e sustentável, por meio da reciclagem de produtos e subprodutos, que promoveram a redução do consumo específico de energia.

Em uma planta siderúrgica integrada, as etapas mais emissoras de efluentes são a coqueria, a sinterização, a redução no alto-forno e a aciaria. As novas tecnologias e mudanças de processos buscam eliminar algumas etapas ou mitigar o impacto ambiental produzido. Nesse aspecto, há uma tendência mundial no sentido de compactar as plantas siderúrgicas, visando a uma maior utilização de sucata reciclável e flexibilização dos processos, o que explica o emprego crescente de aciarias elétricas, plantas semi-integradas conhecidas como *minimills*.

A Tabela 1 apresenta os principais insumos energéticos e efluentes gerados nas principais etapas/processos siderúrgicos:

Tabela 1 | Principais insumos energéticos e efluentes da siderurgia

	Principais insumos energéticos	Principais efluentes				
		Gasosos	Líquidos	Sólidos		
Rota integrada a coque	Sinterização	Coque	Material particulado, CO, CO ₂ , SO ₂ , NO _x , VOCS, HF e HCL	-	Pós, lamas e carepas	
	Coqueria	Carvão metalúrgico	Energia elétrica (baixo consumo)	Material particulado, CO, CO ₂ , SO ₂ , NO _x , VOCS, benzeno, PAH e CH ₄	Amônia, benzeno, tolueno e xileno	Material particulado e alcatrão
	Alto-forno	Coque, PCI	Energia elétrica (baixo consumo)	Material particulado, CO, CO ₂ , SO ₂ , NO _x , VOCS, HF e HCL	-	Pós, lamas e escória
	Aciaria a oxigênio (LD/BOF)	Energia elétrica (baixo consumo)	Material particulado, metais (zinco), CO, VOCS, HF e HCL	-	Pós, lamas, metais solúveis, zinco e escória	
	Lingotamento contínuo	Energia elétrica (baixo consumo)	-	Óleo	Sólidos suspensos e sucata	
	Laminação	Gás de coqueria, gás de alto-forno ou de aciaria e energia elétrica (alto consumo)	Material particulado, CO, CO ₂ , SO ₂ , NO _x , VOCS e vapores ácidos	Óleos e ácidos	Carepas, lamas e <i>pickle liquor</i> (líquor ácido)	
Rota via EAF	Aciaria elétrica	Energia elétrica (alto consumo)	Material particulado, metais (zinco, chumbo e mercúrio), CO ₂ e dioxinas	-	Pós, lamas e escória	
	Lingotamento contínuo	Energia elétrica (baixo consumo)	-	Óleo	Sólidos suspensos e sucata	
	Laminação	Gás natural e energia elétrica (alto consumo)	Material particulado, CO, CO ₂ , SO ₂ , NO _x , VOCS e vapores ácidos	Óleos e ácidos	Carepas, lamas e <i>pickle liquor</i> (líquor ácido)	

(*Continua*)

(Continuação)

	Principais insumos energéticos	Principais efluentes			
		Gasosos	Líquidos	Sólidos	
Outras	Redução direta Midrex	Gás natural	NO _x	-	-
	Fusão redutora (Corex)	Carvão mineral (energético ou metalúrgico)	CO ₂	-	-

Fontes: CGEE (2009) e Costa (2002).

Os resíduos sólidos siderúrgicos podem ser classificados em três categorias básicas: (i) recicláveis que contêm ferro – entre os quais, citam-se as poeiras e lamas de alto-forno, de aciaria e de sinterização; as lamas das unidades de tratamento; água de recirculação da laminação; e as carepas; (ii) resíduos carboquímicos, provenientes, basicamente, das etapas de produção de coque; e (iii) as escórias – geradas, principalmente, na produção de ferro-gusa no alto-forno e nas aciarias a oxigênio e elétricas.

Sustentabilidade da siderurgia

A dinâmica da siderurgia mundial, como de diversos outros setores industriais, tem sido diretamente afetada por fatores econômicos e socioambientais, que representam enormes desafios em médio e longo prazos para o setor, entre os quais, estão:

- enorme expansão da capacidade produtiva de produtos siderúrgicos, com aumento da concorrência e da pressão sobre o preço de insumos na última década;
- intensificação da pressão exercida para a redução de impactos ambientais, em um contexto de maior exigência por qualidade de vida; e
- elevação e incerteza sobre preços de energia em âmbito mundial.

Em 2013, a capacidade de produção mundial de aço foi de 2.166 milhões de toneladas, enquanto a produção de aço bruto apurada foi de 1.606 milhões de toneladas, o que revela a enorme capacidade ociosa da indústria, que normalmente opera com o Nível de Utilização da Capacidade Instalada (Nuci) acima de 85%. Esse fato acentua a competição pelos mercados consumidores, além de se constituir em enorme pressão sobre o preço dos insumos e do produto final.

Os dez maiores países produtores mundiais, cujas eficiência energética e competitividade são analisadas neste estudo, somaram, em 2013, 1.338 milhões de toneladas, representando 83,3% do total produzido de aço bruto no mundo. A Tabela 2 apresenta a produção desses países em 2013 e 2012, bem como a variação percentual ano a ano.

Tabela 2 | Produção de aço dos dez maiores países produtores (em milhões de t)

País	Produção 2013	Produção 2012	Varição 2013-2012 (%)
China	779,0	731,0	6,6
Japão	110,6	107,2	3,2
EUA	86,9	88,7	(2,0)
Índia	81,2	77,3	5,0
Rússia	69,5	70,4	(1,3)
Coreia do Sul	66,1	69,1	(4,3)
Alemanha	42,6	42,7	(0,2)
Turquia	34,7	35,6	(2,5)
Brasil	34,2	34,5	(0,9)
Ucrânia	32,8	33,0	(0,6)

Fonte: IABr.

No fim de 2013, o parque produtor de aço brasileiro, composto de 29 usinas, tinha capacidade instalada de 48,5 milhões de toneladas anuais de aço bruto, apresentando, a exemplo da indústria mundial, sobrecapacidade de oferta, com uma produção de 34,2 milhões de toneladas no mesmo ano.

No Brasil, o setor siderúrgico, nos próximos anos, além de enfrentar a pressão competitiva atual, deverá deparar com maior elevação nos preços de energia elétrica em relação à média dos principais países produtores. Além disso, outros importantes fatores com impacto sobre a competição dos produtores brasileiros são a taxa de câmbio, com períodos de apreciação excessiva, e a tributação elevada.

Esse setor, no país, é o maior emissor industrial de gases de efeito estufa (GEE) e segundo maior consumidor industrial de energia. De acordo com dados do balanço energético nacional de 2014 (ano-base 2013), a produção de ferro primário e aço respondeu por 18,4% do consumo industrial de energia. A indústria siderúrgica emitiu 46% da emissão total do Setor *Processos Industriais em 2010* (dados de estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil, publicado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e

Inovação – MCTI em 2013). Considerando as emissões brasileiras totais, o setor respondeu por cerca de 3,7%.

A maior competição enfrentada impõe às indústrias do setor o desafio de reduzir custos e elevar a competitividade, ao mesmo tempo contemplando soluções capazes de promover a redução do consumo energético e do volume de emissões.

Atualmente, existem diversas ações voltadas à promoção da sustentabilidade da indústria do aço, a exemplo de monitoramentos realizados pela World Steel Association (WSA)² e pelo Instituto Aço Brasil (IABr).

Anualmente, a WSA publica um relatório com um conjunto de oito indicadores selecionados, avaliando a *performance* ambiental, social e econômica da indústria siderúrgica mundial. No que diz respeito à questão ambiental, o relatório apresenta três indicadores de sustentabilidade: (i) emissão de GEE, em t CO₂ eq/t de aço bruto; (ii) intensidade energética, em GJ/t de aço bruto; e (iii) rendimento dos insumos, em % convertido em produtos, subprodutos ou coprodutos. Também anualmente, o IABr publica um relatório de sustentabilidade da siderurgia brasileira, seguindo as orientações da WSA e baseando-se também no Global Report Initiative (GRI). A seguir, a tabela apresenta os três indicadores citados de sustentabilidade da WSA e do IABr, de 2009 a 2011 (último ano de publicação dos dados pelo IABr):

Tabela 3 | Indicadores de sustentabilidade

Sustentabilidade ambiental	2009	2010	2011	2012
Emissão de gases do efeito estufa (t CO₂ eq./t de aço bruto)				
WSA	1,80	1,8	1,7	1,7
IABr	1,59	1,7	1,7	1,7
Intensidade energética (GJ /t de aço bruto)				
WSA	20,10	20,7	19,6	19,6
IABr	18,20	18,7	19,4	n/d
Eficiência de materiais (% de material convertido em produtos, coprodutos e subprodutos)				
WSA	97,90	97,7	94,4	96,4
IABr	98,50	98,1	98,1	n/d

Fontes: IABr e WSA.

² A World Steel Association (Associação Mundial do Aço, em português) congrega cerca de 170 siderúrgicas, associações nacionais e regionais da indústria do aço, bem como institutos de pesquisa, representando cerca de 85% da produção mundial de aço.

No Brasil, citam-se também: o Programa Brasileiro GHG Protocol, voltado ao controle e à gestão de emissões de GEE; e o Protocolo de Sustentabilidade do Carvão Vegetal, iniciativa do IABr que contou com a adesão de todas as associadas do Instituto e prevê que, em 2016, 100% da demanda de carvão vegetal da siderurgia seja suprida por meio de plantio próprio ou de terceiros (em 2013, 88,7% da madeira para produção de carvão vegetal teve origem em floresta plantada própria, 7,7% em floresta plantada de terceiros e 3,6% em resíduos florestais legalizados).

Além dessas iniciativas, há diversos programas no mundo com o desafio de desenvolver novas tecnologias e soluções, bem como de promover redução de consumo energético e emissões de GEE, entre os quais, citam-se:

- **Estados Unidos da América (EUA)**

- Better Plants Program (BPP)

O BBP é uma iniciativa voluntária da qual as plantas industriais podem participar, por meio de compromisso voluntário, visando à redução do consumo de energia, em até 25%, no prazo de dez anos. Para tanto, as empresas participantes ganham, além de reconhecimento, suporte técnico do Departamento de Energia dos Estados Unidos (Department of Energy – DOE). O referido programa integra iniciativa governamental (Save Energy Now LEADER) e foi criado em 2009 com o objetivo de alcançar um índice de redução de 25% no consumo de energia industrial até 2017.

Além do BBP, os EUA apresentam outras ações, como o Industrial Technologies Program (ITP), no qual se encontra o Advanced Manufacturing Office (AMO) (maior programa do governo dos Estados Unidos), com o objetivo de desenvolver a aplicação de novas tecnologias energoeficientes para a indústria em geral.

- **União Europeia**

- EU Emissions Trading Scheme (EU ETS)

O Esquema Europeu de Comercialização de Emissões é um sistema de limitação de emissões e comercialização (*cap and trade*) de créditos de carbono, baseado no Protocolo de Quioto. Para as atividades industriais mais intensivas em emissões de GEE, como é o

caso da siderurgia, o EU ETS estabelece limites anuais de emissões de CO₂ eq, por empresa.

De acordo com as regras do EU ETS, ao fim de cada ano, as empresas devem apresentar seus inventários de emissões de GEE. Caso as empresas emitam cotas abaixo do limite estabelecido, terão direito a créditos de carbono, que podem ser negociados com outras empresas ou guardados para utilização futura. Caso ultrapasse o limite estabelecido, a empresa paga pesadas multas, proporcionais ao volume de GEE emitido acima da cota, ou terá de compensar esse volume com créditos de carbono, que podem ser próprios ou adquiridos de outras empresas.

- Ultra-Low CO₂ Steelmaking (ULCOS)

O ULCOS tem por objetivo minimizar os volumes de emissão de dióxido de carbono (CO₂) nos processos de produção do aço. Trata-se de um consórcio de 48 empresas europeias e organismos de 15 países europeus, que lançaram uma iniciativa de cooperação em P,D&I, que visa ao apoio a projetos que possibilitem significativa redução nas emissões de CO₂ advindas da produção do aço. O consórcio é formado pelas maiores siderúrgicas europeias, empresas de energia, institutos de pesquisa e universidades, que contam com o suporte da Comissão Europeia.

• **China**

- Programa chinês para padronização da energia industrial

Como parte desse programa, são criados padrões de eficiência energética, nos quais são definidos níveis mínimos de eficiência energética a serem aplicados nas plantas existentes, levando-se em conta os diferentes tipos de matérias-primas, unidades auxiliares e combustíveis empregados nas plantas siderúrgicas.

Eficiência energética e emissões

A indústria do aço busca continuamente alternativas tecnológicas e operacionais para aumentar sua eficiência energética. Nos últimos cinquenta anos, o setor reduziu o consumo energético por tonelada produzida em 60%. No

entanto, em razão dessa vertiginosa queda, a redução do consumo de energia nos últimos anos tem ocorrido a taxas declinantes e deverá ser cada vez mais difícil obter ganhos de eficiência com base nas tecnologias existentes.

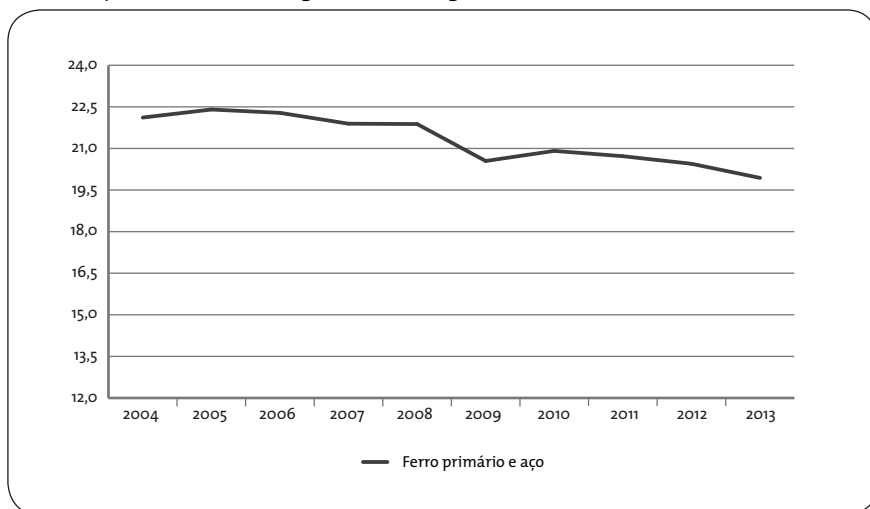
Por sua vez, mais de 80% das emissões de GEE na siderurgia provêm do consumo de insumos energéticos. Portanto, ao seguir um movimento semelhante ao do consumo de energia, reduzir as emissões de CO₂ dependerá, cada vez mais, do desenvolvimento e da introdução de novas tecnologias na produção de aço.

Nos últimos anos, as empresas siderúrgicas brasileiras, seguindo o movimento mundial, desenvolveram ações para reduzir o consumo energético em suas operações, com destaque para: (i) cogeração de energia elétrica através do reaproveitamento dos gases do processo; (ii) substituição de insumos/combustíveis; (iii) otimização do controle dos processos via automação; e (iv) programas de treinamento/sensibilização de fornecedores.

Na siderurgia, o consumo de energia se dá, basicamente, na forma de energia térmica e de energia elétrica. A energia térmica envolve quase todos os processos, sendo mais intensamente utilizada em unidades integradas, que englobam os processos de sinterização, coqueificação e redução. As etapas de coqueificação e redução, embora intensivas em energia, são as que apresentam maior potencial absoluto de economia e recuperação, considerando tanto a energia contida no coque quanto nos gases e calor dos processos.

O uso de energia elétrica é mais intenso na laminação a quente e na etapa de refino, tanto nos fornos elétricos como nos conversores a oxigênio. Cabe destacar que a energia elétrica, basicamente, é usada na siderurgia como força eletromotriz, salvo no caso dos fornos elétricos, que empregam a energia elétrica para a fusão de carga metálica e refino do aço. Nesse processo, usam-se eletrodos de grafite, que criam um diferencial de tensão entre eles e/ou a carga, fazendo surgir um arco voltaico que fornece calor necessário à fusão do metal.

A seguir, apresentam-se evolução do consumo total de energia, em gigajoule por tonelada (GJ/t), na produção de aço e de ferro-gusa no Brasil de 2004 a 2013 (incluindo-se a produção de ferro-gusa de produtores independentes) e sua respectiva distribuição.

Gráfico 1 | Consumo de energia da siderurgia brasileira (em GJ/t)

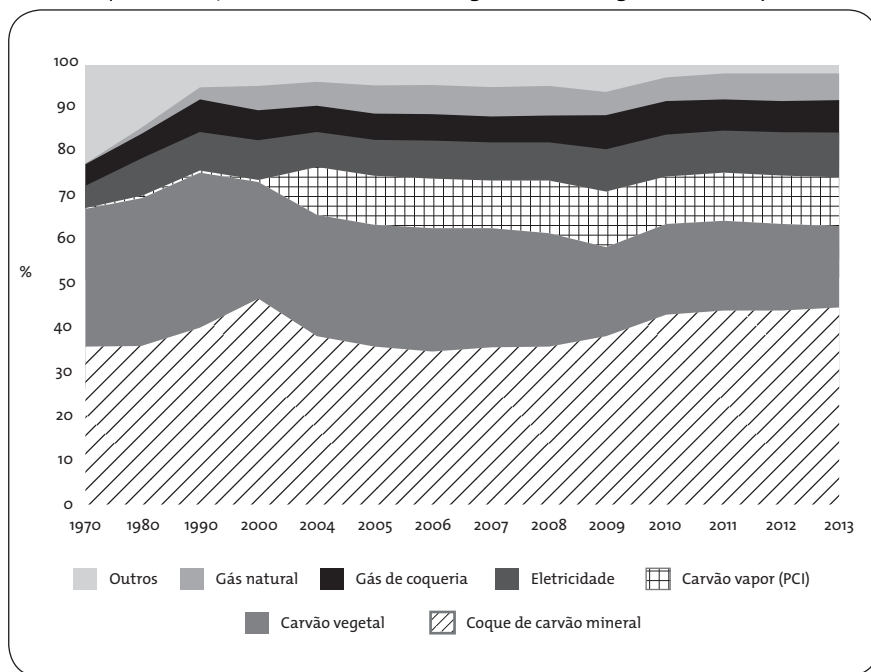
Fonte: BEN-2014.

Pode-se observar a redução de consumo total de energia da siderurgia brasileira a uma taxa média de 1,15% ao ano, explicada pela adoção de medidas e tecnologias mais eficientes, principalmente pelas plantas com entrada em operação mais recente.

No Anexo I, encontram-se tabelas com os consumos energéticos de três unidades siderúrgicas brasileiras típicas, com a quantificação da energia em cada etapa e o consumo total em GJ/t.

A seguir, apresentam-se as principais fontes de energia da siderurgia brasileira, com o percentual da energia total consumida.

Conforme se observa, o coque de carvão mineral, que, em 2013, representou 44,9% do total do consumo em GJ, nos últimos anos apresentou o maior crescimento de uso em relação às demais fontes. Esse fato deve-se principalmente ao aumento relativo da produção de aço bruto via LD/BOF, em unidade integrada, com a entrada recente em produção da Companhia Siderúrgica do Atlântico (CSA). Outro ponto importante é a forte presença do carvão vegetal na matriz energética da siderurgia brasileira. Atualmente, o Brasil é o único país que utiliza esse insumo como termorredutor na produção de ferro-gusa, viável por conta da disponibilidade de vastas áreas de floresta e da ausência de carvão metalúrgico, que é importado em sua totalidade.

Gráfico 2 | Distribuição do consumo de energia da siderurgia brasileira por fonte

Fonte: BEN-2014.

Embora, nos últimos anos, tenha-se observado redução do consumo total, a indústria siderúrgica, como já citado, permanece como o maior emissor industrial de GEE, o que impõe ao setor a responsabilidade de seguir avançando no processo de redução do consumo de energia e de emissões.

Para reduzir o impacto ambiental provocado pelo setor, a indústria tem executado, em todo o mundo, programas com metas ambiciosas de redução de GEE, a exemplo do programa ULCOS, já citado, com uma meta de 50% de redução das emissões, o que poderia ser atingido a partir de 2020.

Além disso, contribui para o prosseguimento dessa trajetória de queda a difusão de uma série de medidas e tecnologias relacionadas principalmente à recuperação de gases e calor. Isso porque, em função da qualidade e energia térmica, os gases provenientes dos processos siderúrgicos podem ser usados em outras etapas na planta, assim como na geração de energia elétrica e de vapor. Entre esses gases, destacam-se o gás de coqueria (GCO), o gás de alto-forno (GAF) e o gás de aciaria (GAC). O aproveitamento dos gases e dos resíduos sólidos representa uma tendência mundial.

É importante observar que, no Brasil, o gás de coqueria apresenta alto índice de reaproveitamento, tendo alcançado cerca de 99% em 2013. A siderurgia brasileira ainda tem a possibilidade de melhorar o aproveitamento dos gases de alto-forno e de aciaria, que se encontram na faixa de 90% e 70%, respectivamente [IABr (2013)]. Cabe destacar que, quanto maior for o reaproveitamento dos gases, menor será o consumo de insumos não renováveis no processo produtivo, além de permitir a cogeração de energia elétrica.

Energia elétrica

O atual cenário desfavorável do mercado de energia elétrica brasileiro, com tendência de custos mais elevados a partir da utilização de fontes mais onerosas de geração, leva à necessidade de se realizar um esforço adicional no sentido de reduzir, particularmente, o consumo de eletricidade. Esse objetivo, a ser perseguido por diversos setores consumidores, aplica-se fortemente à siderurgia, que, além de apresentar elevado consumo total de energia, tem elevado consumo específico de eletricidade.

O objetivo consiste em reduzir o consumo de eletricidade da rede, uma vez que a indústria siderúrgica apresenta grande potencial de cogeração.

Tabela 4 | Balanço de energia elétrica da siderurgia brasileira

Balanço de energia elétrica*	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Consumo total (GWh)	18.363	18.622	14.898	18.755	19.933	19.717	19.671
Autoprodução (GWh)	5.149	7.035	5.954	6.224	10.633	9.433	10.900
Consumo líquido da rede (GWh)	13.214	11.587	8.944	12.531	9.300	10.284	8.771
Consumo líquido específico (MWh/t)	391	343	337	381	265	297	257

Fonte: BEN-2014.

* Dados referentes à produção de ferro-gusa e aço no Brasil.

Na siderurgia, os processos mais intensivos em energia elétrica são a aciaria elétrica (EAF), os conversores a oxigênio LD/BOF e a laminação a quente. Em 2013, a soma do consumo de energia elétrica em EAF e em LD/BOF respondeu por aproximadamente 46% do consumo total de energia elétrica na produção do aço. Ressalta-se que, no Brasil, a energia elétrica corresponde a cerca de 14% do total dos custos de produção de uma *minimill*, que utiliza o forno elétrico, enquanto, na produção de uma unidade integrada a coque, esse custo representa apenas 3%.

Conforme observado, a indústria brasileira tem reduzido o consumo de energia elétrica da rede e, em 2013, apresentou um consumo por tonelada de aço produzida 34,4% inferior ao verificado em 2007.

A redução é explicada pela capacidade de autoprodução de energia das indústrias siderúrgicas, que se tem elevado principalmente por conta da entrada em operação de novas plantas, as quais contemplam usinas com grandes potenciais termelétricos, como é o caso da CSA, com operação em volumes significativos a partir de 2011. Cabe citar a autoprodução prevista da Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), ainda em construção.

A Tabela 5 apresenta as usinas de geração elétrica das principais companhias siderúrgicas brasileiras (omitem-se as pequenas usinas geradoras, em sua maioria composta de guseiros independentes).

Tabela 5 | Usinas de geração elétrica – siderurgia brasileira

Usina	Potência (kW)	Proprietário	Município	Fonte
Usinas em operação				
Açominas	102.890	Gerdau Açominas S.A.	Ouro Branco (MG)	Gás de alto-forno – CM
CST	225.100	Arcelor Mittal Brasil S.A.	Serra (ES)	Efluentes gasosos
CTE II	177.970	Companhia Siderúrgica Nacional	Volta Redonda (RJ)	Gás natural
Cosipar	14.000	Companhia Siderúrgica do Pará	Marabá (PA)	Gás de alto-forno – CM
Cosipa	27.000	Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A.	Cubatão (SP)	Gás de alto-forno – CM
Usiminas	18.810	Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A.	Ipatinga (MG)	Gás de alto-forno – biomassa
Sol	147.300	Arcelor Mittal Brasil S.A.	Serra (ES)	Calor de processo – OF
Usiminas 2	63.155	Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A.	Ipatinga (MG)	Gás de alto-forno – biomassa
Do Atlântico	490.000	ThyssenKrupp CSA Siderúrgica do Atlântico Ltda.	Rio de Janeiro (RJ)	Efluentes gasosos

(*Continua*)

(Continuação)

Usina	Potência (kW)	Proprietário	Município	Fonte
Usinas em operação				
Cosipa II	18.500	Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A.	Cubatão (SP)	Gás de alto-forno – CM
Usinas em construção				
CSP	218.000	Companhia Siderúrgica do Pecém	São Gonçalo do Amarante (CE)	Gás de alto-forno – biomassa
Usinas ainda não iniciadas				
TRT	21.000	Companhia Siderúrgica Nacional	Volta Redonda (RJ)	Gás de alto-forno – CM

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

A CSA responde por cerca de 38% da capacidade de geração energética dos produtores de aço, graças à implantação de tecnologias que permitem o reaproveitamento dos gases e do calor resultante da produção. O gás gerado na coqueria e na operação dos dois altos-fornos, bem como o calor resultante dos processos, movimentam três turbinas: uma a vapor, de 310 MW, e duas a gás, com capacidade de 90 MW cada.

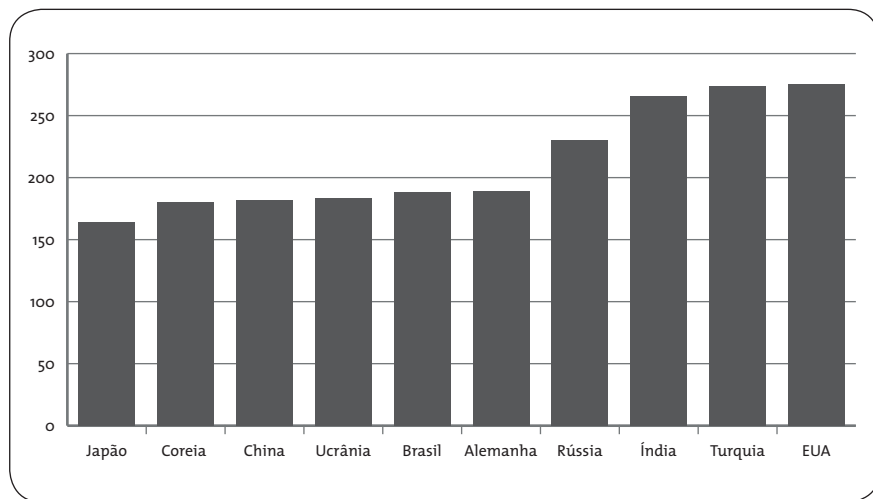
A geração elétrica da planta excede sua necessidade de consumo, e esse excedente é vendido na rede, conferindo capacidade adicional ao sistema elétrico. A planta pode ser considerada referência quanto a eficiência energética, com baixos índices de emissão de GEE, contemplando ainda a reutilização do gás de aciaria nos processos de sinterização e redução, o que reduz o consumo de gás natural.

Quanto à eficiência energética e de consumo de energia elétrica, a indústria siderúrgica brasileira é composta por um mix de indústrias mais ou menos eficientes, englobando algumas usinas autossuficientes em energia elétrica, como é o caso da CST, mas também usinas ainda carentes de investimentos para a adoção de tecnologias que promovam maior eficiência, a exemplo dos processos de recuperação de gases e calor.

Na comparação com os dez maiores produtores mundiais de aço, o Brasil apresenta consumo relativamente baixo, embora ainda esteja acima do

Japão e da Coreia do Sul, países com estrutura produtiva semelhante (participação relativa de BOF e EAF), porém tecnologicamente mais avançados. O Gráfico 3 apresenta o consumo de energia elétrica em kWh/t de aço líquido em 2014, considerando todas as rotas tecnológicas de produção de aço (BOF, EAF e OH):

Gráfico 3 | Consumo de energia elétrica dos dez maiores países produtores (kWh/t de aço líquido) – 2014



Fonte: CRU (2014c).

O consumo de energia elétrica por tonelada de aço produzido leva em consideração, além da eficiência e das tecnologias de recuperação aplicadas aos processos, a rota empregada na produção de aço. Assim, Estados Unidos e Turquia, com grande parte da produção através de aciarias elétricas (EAF), apresentam-se mais intensivos no uso desse insumo energético. Cabe destacar que os Estados Unidos contam com grande geração de sucata, sendo um dos poucos países do mundo com escalas de produção que suportam o uso do EAF na produção de aços planos.

Nos capítulos seguintes, são realizadas análises do consumo de energia e dos principais insumos na produção de aço no país, por rota de produção – integrada (alto-forno + BOF) e *minimills* (EAF) –, com uma breve avaliação da eficiência e da competitividade brasileira na produção, respectivamente, de aços laminados planos – representados pela bobina a quente (BQ) – e laminados longos – representados pelo vergalhão.

Eficiência e competitividade da produção em usinas integradas

Mundialmente – o Brasil incluído –, a maior parcela da produção de aço é feita em usinas integradas a coque (aproximadamente 74%, em 2013), as quais integram a redução de minério de ferro (produção de ferro primário) no alto-forno e a conversão em aço com uso de conversores a oxigênio. Essa também é a rota mais utilizada na produção de aços planos. Atualmente, a produção de aço em unidades integradas a coque exige escalas econômicas de cerca de 2,5 milhões de toneladas por alto-forno, apresentando-se muito mais concentrada que a produção de aço a partir de *minimills*, unidades semi-integradas que utilizam fornos elétricos a arco.

Etapa de redução

Antecede a produção de aço líquido. Nela, o minério de ferro é transformado em ferro metálico, ou ferro primário, no alto-forno (AF). A alimentação do AF é feita basicamente de carga ferrosa (minério na forma de granulado, pelota e/ou sinter) e de matéria carbonosa (coque e carvão), além de fluxantes e fundentes.

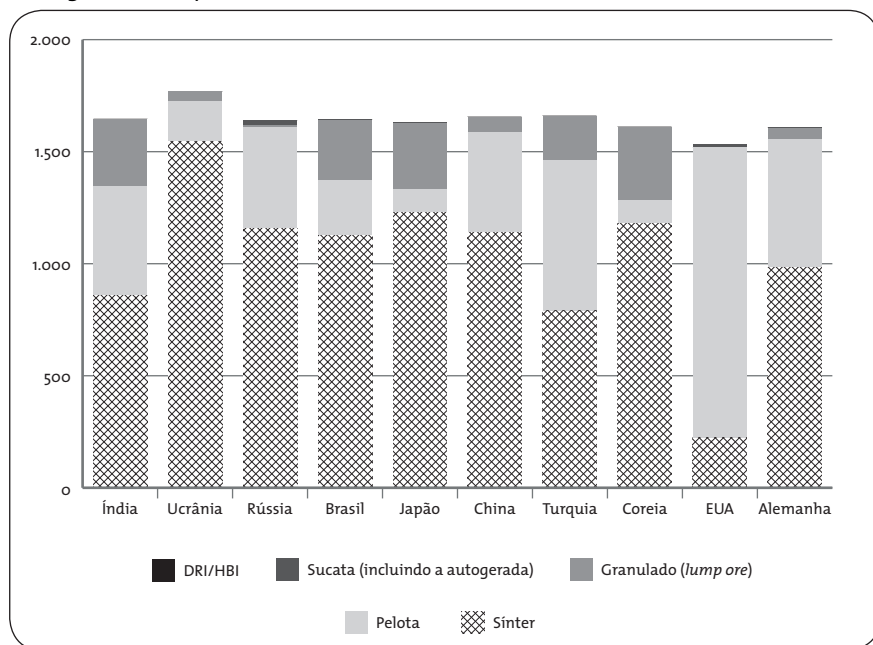
O consumo médio dos dez maiores produtores mundiais de carga ferrosa é de 1.634 kg/t de ferro-gusa. Hoje, a média brasileira é de 1.641 kg/t de ferro-gusa, o que corresponde à sexta menor taxa de consumo entre os dez maiores produtores mundiais. O país que apresenta o menor consumo de carga ferrosa são os Estados Unidos, com 1.520 kg/t de ferro-gusa, pela opção, mais onerosa, do uso praticamente integral de pelota. Cabe observar que o consumo depende do *mix* da carga.

Outro aspecto importante a ser considerado na produção de ferro-gusa é a taxa de geração de escória. Atualmente, a média de produção de escória entre os dez maiores produtores é de 294 kg/t de gusa líquido. A produção de escória, além de outros fatores, decorre, em boa parte, do *mix* da carga e da qualidade do minério. No Brasil, a produção de escória é de 300 kg/t de gusa líquido. A Ucrânia e a China têm as maiores taxas de produção de escória, 444 kg/t e 342 kg/t de gusa líquido, respectivamente.

A etapa de redução em usinas integradas a coque é uma das etapas de produção de aço mais intensivas em energia. A energia consumida corresponde, principalmente, à energia térmica do agente termorreduzidor, o coque,

e à injeção de finos de material carbonoso pelas laterais do AF. Nessa etapa, a energia térmica despendida pode chegar a até cerca de oito vezes o consumo de energia térmica no processo de coqueificação, segunda etapa mais intensiva em energia térmica. No consumo de energia elétrica, essa etapa fica atrás somente da laminação a quente e da aciaria elétrica.

Gráfico 4 | Carga ferrosa (metálica) do alto-forno: dez maiores países produtores (em kg/t de ferro primário)



Fonte: CRU (2014c).

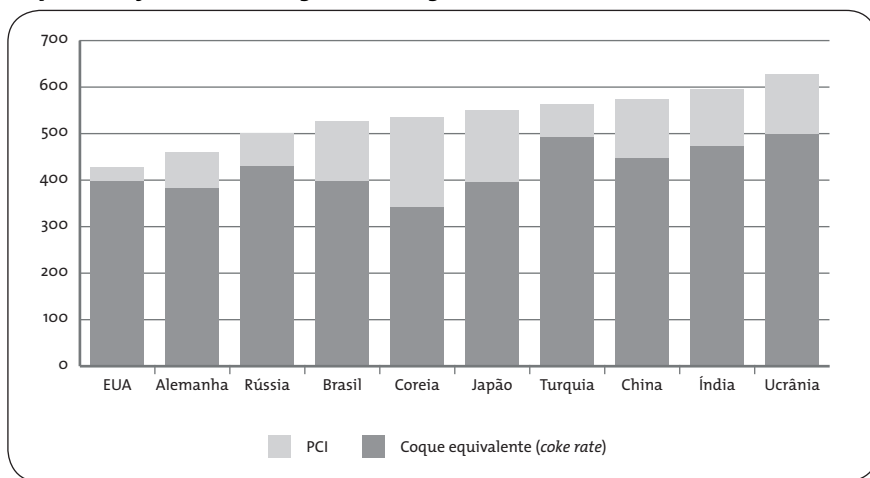
Essa etapa, responsável pelo maior parte do consumo total de energia, dá origem a dois dos principais indicadores de eficiência energética na siderurgia: (i) o consumo específico de coque, em kg/t de ferro-gusa produzido, conhecido pela denominação inglesa *coke rate*; e (ii) o consumo específico de finos de carvão (ou de outra fonte de matéria carbonosa), conhecido pela designação, em inglês, *pulverized coal injection* (PCI).

Em tese, é possível diminuir a utilização de coque (*coke rate*) através do aumento de PCI. Essa substituição permite a redução do consumo de energia na produção de ferro-gusa, dado que o carvão é injetado diretamente nos altos-fornos, sem a necessidade de coqueificação. A taxa de consumo

desses dois insumos energéticos somados por tonelada produzida é denominada de *fuel rate*.

O Gráfico 5 apresenta o consumo de coque e de PCI (*fuel rate*) dos dez maiores produtores mundiais.

Gráfico 5 | Consumo de material carbonoso: dez maiores países produtores – coque + PCI (*fuel rate*) (em kg/t de ferro-gusa)



Fonte: CRU (2014c).

Como observado, o Brasil apresenta um *fuel rate* relativamente baixo, acima apenas de Rússia, EUA e Alemanha, que, contudo, por questões relacionadas à oferta de outros insumos energéticos, realizam grande injeção de gás natural (Rússia e EUA) e de óleo combustível (Alemanha).

De acordo com um estudo realizado em setembro de 2012 pela EPA (United States Environmental Protection Agency), intitulado “Available And Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Iron and Steel Industry”, é possível utilizar até 225 kg/t de PCI em AF, visando ao aumento de sua eficiência energética. De acordo com esse estudo, nos Estados Unidos seria possível reduzir o consumo de energia em até 0,77 GJ/t de gusa líquido, com um investimento médio de US\$ 45/t de PCI injetado.

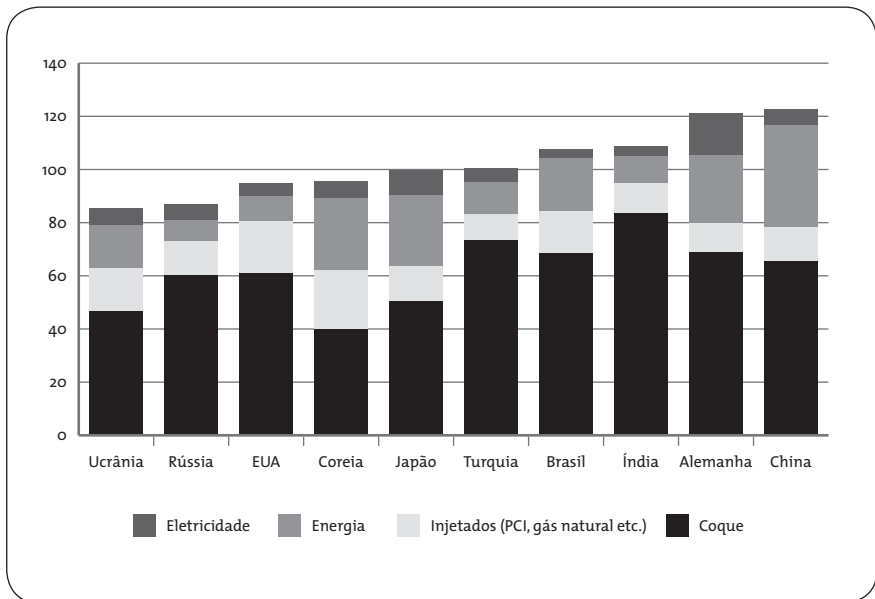
Atualmente, a média dos dez maiores produtores é de 111 kg de PCI/t de gusa. O país que mais recorre a essa substituição é a Coreia do Sul, com 195 kg de PCI/t de gusa e o menor consumo de coque. O Brasil apresenta

consumo médio de 130 kg de PCI/t de gusa, sendo o segundo mais intensivo no uso de PCI. Algumas siderúrgicas, inclusive, utilizam finos de carvão vegetal em substituição ao PCI.

Os Estados Unidos apresentam a menor média de consumo, cerca de 31 kg de PCI/t de gusa, que é compensada pela injeção de cerca de 3,5 GJ/t de gás natural, em face da abundância desse insumo.

A partir da análise realizada, pode-se considerar a indústria coreana uma das mais avançadas, cujo baixo consumo influi diretamente no custo de energia envolvido na produção de ferro-gusa, atualmente o quarto menor custo, atrás apenas de Ucrânia, Rússia e EUA, países que têm preços relativos muito baixos de coque (Ucrânia) e gás natural (Rússia e EUA).

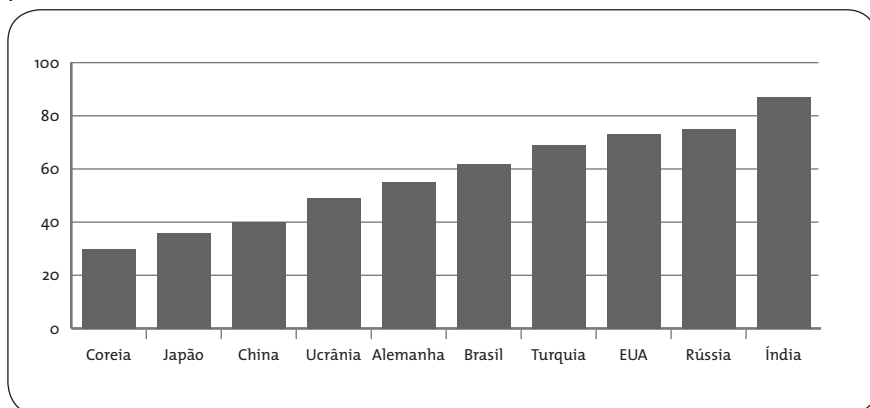
Gráfico 6 | Custo de energia na etapa de redução: dez maiores países produtores (em US\$/t)



Fonte: CRU (2014c).

A vantagem oriunda dos preços relativamente baixos dos insumos envolvidos no processo, caso dos países anteriormente citados, é parcialmente eliminada quando considerado o crédito gerado a partir da recuperação de energia do processo e calculado o consumo líquido de energia, apresentando a seguir:

Gráfico 7 | Custo líquido de energia na etapa de redução – dez maiores países produtores (em US\$/t)



Fonte: CRU (2014c).

Apesar de apresentar um *fuel rate* relativamente baixo, o Brasil tem um custo de energia elevado, posicionando-se entre os países com custos mais elevados, quando considerados tanto o consumo total quanto o consumo líquido (descontada a energia recuperada no alto-forno). O custo elevado pode ser explicado principalmente por preços relativos mais elevados de coque e gás natural. O custo elevado do coque no Brasil possibilitaria avanços no processo de produção via maior substituição do coque, a exemplo da Coreia do Sul, com redução no custo total de energia.

Aqui, vale destacar que a cogeração de energia elétrica a partir dos gases do alto-forno (GAF), com a utilização de turbinas de topo,³ ainda apresenta espaço para aproveitamento, tanto no Brasil como nos demais produtores.

Entre as unidades de cogeração de eletricidade existentes no Brasil que utilizam o GAF, as usinas mais eficientes atingem uma taxa de conversão energética em torno de 35%. O valor de 30% é uma estimativa razoável para a eficiência média de todos os autoprodutores.

O consumo de energia elétrica de um alto-forno deve-se basicamente à necessidade de energia eletromotriz para a movimentação de grandes volumes de carga. Ganhos de eficiência podem ser obtidos a partir de motores

³ A turbina de recuperação de pressão de topo é instalada na saída do coletor de pó do alto-forno. Após coletados os resíduos, o gás do alto-forno é conduzido para a turbina, acionando-a a partir da expansão do gás, mediante a redução da pressão dos gases, até a pressão atmosférica. A força-motriz da turbina se transfere para o gerador, que, por sua vez, a transforma em energia elétrica.

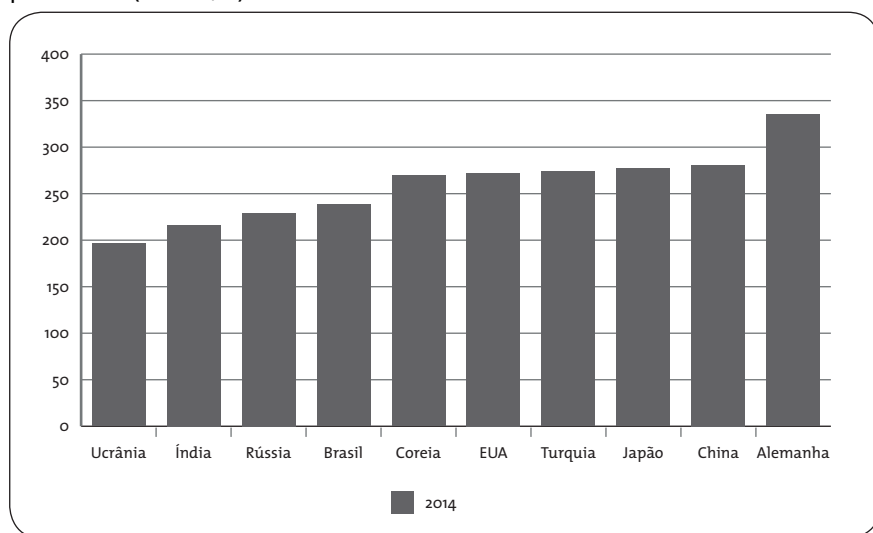
mais eficientes. Embora se trate de uma etapa com consumo relativamente elevado, pode ser superavitária em energia elétrica, a partir da cogeração com o uso de gases e calor do processo, como ocorre com CSA e CST, já citados neste artigo.

Competitividade

O custo do ferro-gusa representa o maior custo de produção do aço e, portanto, influencia diretamente a posição relativa da indústria quanto aos custos de produção de aço.

No gráfico a seguir, são apresentados os custos de produção de ferro primário dos dez maiores países produtores mundiais de aço.

Gráfico 8 | Custo operacional de produção de ferro-gusa: dez maiores países produtores (em US\$/t)



Fonte: CRU (2014c).

Conforme se observa, no processo de produção de ferro primário o Brasil ocupa a quarta posição entre os dez maiores do mundo, mostrando-se bastante competitivo no quesito de custos operacionais da produção de ferro primário. Cabe destacar que tanto a Ucrânia como a Rússia ainda produzem ferro primário com uso da tecnologia *open heart* (OH), que apresenta custos de produção menores, devido, principalmente, ao baixíssimo controle de emissões.

A Rússia apresenta uma vantagem em relação ao processo de coqueificação, cujo produto, o coque, entra na composição dos custos de produção de ferro primário: em 2013, esse país figurou entre os dez países de menor custo de produção do coque. Nesse caso, o Brasil entra em desvantagem, apresentando o maior custo de produção de coque, entre os dez maiores produtores, por causa do custo de importação do carvão metalúrgico, quesito em que o país é totalmente dependente.

A Índia, além da questão do baixo custo de mão de obra, apresenta algumas peculiaridades que lhe conferem vantagem comparativa. Nesse país, algumas siderúrgicas adotam tecnologias de redução alternativas conjugadas, como a Corex e a Midrex, com uso de carvão mineral, sem necessidade de coqueificá-lo. Nas unidades de custos menores de produção de ferro primário, que empregam essa tecnologia, os processos de pelotização são feitos pela própria siderúrgica, com minério próprio (cujo preço é repassado a custo de transferência), e chegam a representar mais de 60% da carga metálica utilizada.

No Brasil, atualmente não há utilização de gases na etapa de redução do minério para a produção de ferro-esponja (DRI), seja o gás natural, sejam aqueles provenientes da gaseificação do carvão. A experiência mais recente na siderurgia brasileira foi realizada na Usiba, do Grupo Gerdau, que encerrou a operação por considerá-la inviável.

Etapa de produção de aço líquido (BOF)

Nessa etapa, para a produção de aço líquido, são consumidos basicamente o ferro-gusa produzido na etapa de redução e sucata de ferro, que constituem a carga ferrosa, e outras ligas metálicas, de acordo com as especificações técnicas desejadas.

Os níveis de consumo de carga metálica são relativamente homogêneos, com variação máxima em torno de 3,4% entre os maiores produtores. Os países que apresentam as menores taxas de consumo são Estados Unidos, Coreia do Sul e Japão.

A produção e o refino do aço em conversores a oxigênio (BOF), diferentemente da etapa de redução, consomem um volume muito baixo de energia. No entanto, essa é uma etapa intensiva em emissões, porque é nela que ocorre a diminuição do nível de carbono contido no ferro-gusa, a partir da

injeção de oxigênio puro, com a formação de gás com elevada concentração de CO. A recuperação dos gases e o calor liberado representam oportunidades de ganho de eficiência energética e ambiental, além de redução do consumo total da planta produtiva.

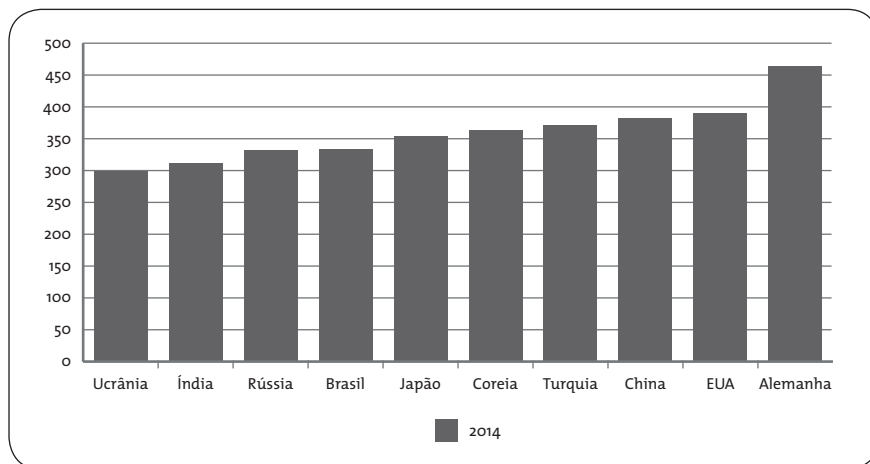
Há informações sobre medidas de recuperação de gás de BOF adotadas em usinas europeias da ArcelorMittal - Florange (França), Bremen (Alemanha) e Gent (Bélgica). Na usina de Bremen, 80% do gás recuperado é utilizado no forno de aquecimento da laminação em substituição ao gás natural, enquanto o restante é destinado à cogeração de energia elétrica. Estima-se que, nesse caso, o sistema de recuperação gera redução das emissões de GEE em até 100.000 t/ano. Quanto à eficiência energética, a recuperação de gás de BOF geraria uma economia de 3% a 4% do consumo total de energia da planta.

No Brasil, ainda há espaço para a implantação de sistemas de recuperação de gás de BOF, a exemplo de um projeto recente de instalação da Gerdau Açominas, que aproveita o gás gerado como combustível nas caldeiras de sua central termelétrica. Dessa forma, a maior difusão de sistemas de recuperação de gás de BOF se constitui em oportunidade de promoção de eficiência energética e redução de emissões para a indústria brasileira.

Competitividade

O Brasil se encontra relativamente bem posicionado quanto ao custo de produção de aço líquido via BOF, em virtude da competitividade advinda principalmente do custo da carga ferrosa consumida no processo, que, como já citado, representa um dos principais determinantes de competitividade da siderurgia. Entre os dez maiores produtores, o Brasil ocupa a quarta posição, como observado no Gráfico 9.

Apesar da posição relativamente favorável, o Brasil apresenta custos de conversão da carga ferrosa em aço líquido bem elevados, o que revela um cenário desfavorável quanto à competitividade dessa etapa de produção no Brasil. Entre os principais fatores negativos, destacam-se: custos de ferroligas utilizadas para refino, custos de mão de obra, gastos com gestão, manutenção e bens acessórios, além da relativamente baixa recuperação de resíduos do processo (gás, escória etc.). Entre os menores custos de conversão, estão os do Japão e os da Coreia.

Gráfico 9 | Custo operacional de produção de aço líquido via BOF: dez maiores países produtores (em US\$/t)

Fonte: CRU (2014c).

A análise ainda revela espaço para ganhos de competitividade via melhoria dos processos de produção e incorporação de tecnologias e medidas promotoras de eficiência.

Produção de laminados planos: BQ

A produção brasileira de laminados planos atingiu um volume de 15 milhões de toneladas em 2013, representando 57,2% do total de aços laminados no país. A produção ocorre integralmente na Região Sudeste, que conta com reservas de minério de ferro, boa logística dedicada e os principais mercados consumidores.

Na Tabela 6, mostra-se a evolução recente da produção brasileira de laminados planos, distribuída por empresa, incluindo-se a produção de aços planos especiais e ligados, que, no Brasil, é feita pela Aperam.

Tabela 6 | Produção brasileira de aços planos (em mil t)

Empresa	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Aperam	694	518	677	656	623	673
ArcelorMittal Tubarão	2.468	2.567	3.620	3.510	3.430	3.681
CSN	4.460	3.810	4.653	4.665	4.704	4.587

(Continua)

(Continuação)

Empresa	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Gerdau Aço Minas	-	-	-	-	-	34
Usiminas	6.743	4.957	6.262	5.434	6.140	6.039
Total	14.365	11.852	15.212	14.265	14.897	15.014

Fonte: IABr (2014a).

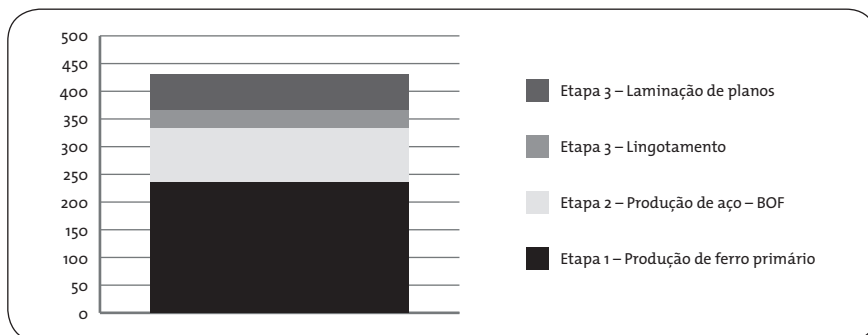
Excluindo-se a Gerdau Açominas, que iniciou a produção de aços planos no fim de 2013, os demais produtores, que contam com uma capacidade conjunta instalada de 23,7 milhões de toneladas por ano de aço bruto, operaram com um NUCI médio de 69,5% em 2013. Avaliando-se apenas a capacidade instalada de laminação a quente de aço (*hot strip rolling capacity*), que foi da ordem de 17,4 milhões de t, o NUCI atingiu cerca de 86%.

Em 2013, do total produzido de aços planos, 96,2% foram destinados aos produtos planos de aço carbono comum, sendo o restante para aços especiais ligados. De 2008 até a presente data, o perfil de produção de laminados planos, no país, praticamente não sofreu modificação.

Depois da redução no alto-forno, o processo de laminação é o maior consumidor de energia em usinas integradas, com uso intensivo de gás natural em fornos de reaquecimento, representando o maior custo de conversão do processo. A laminação a quente é a etapa mais intensiva em energia elétrica numa usina integrada, com consumo em torno de 100 kWh/t.

O Gráfico 10 apresenta a distribuição de custos médios por etapa de produção de aços planos no Brasil (perfil semelhante aos dez maiores produtores considerados neste estudo):

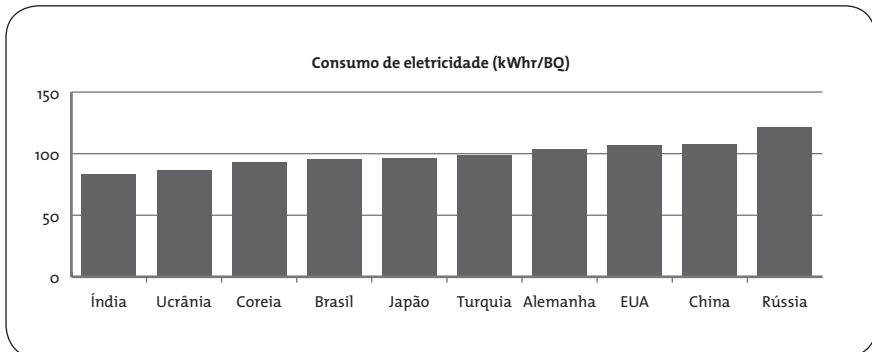
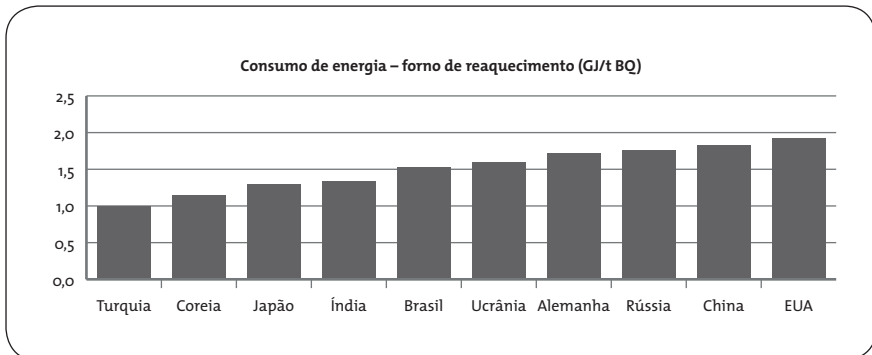
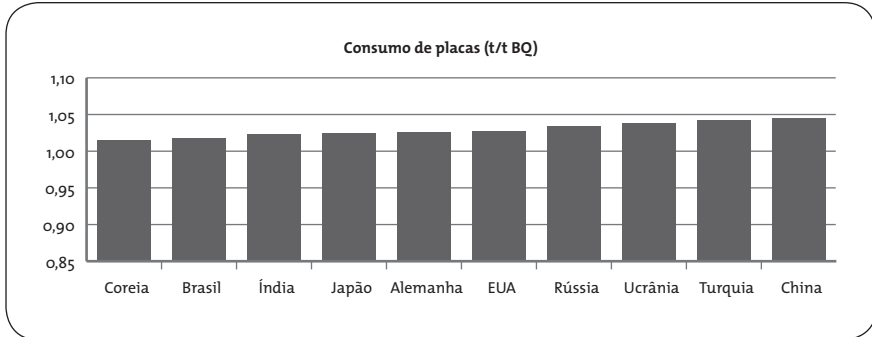
Gráfico 10 | Custo operacional de produção de aços planos por etapa (em US\$/t) – 2014



Fonte: CRU (2014c).

A laminação de bobinas a quente pode ser considerada uma das etapas mais eficientes da siderurgia brasileira, o que se revela pelos relativamente baixos níveis de consumo dos principais insumos (placas, energia para rea-quecimento e eletricidade), como observado nos gráficos a seguir.

Gráficos 11, 12 e 13 | Taxas de consumo dos principais insumos da laminação de bobinas a quente

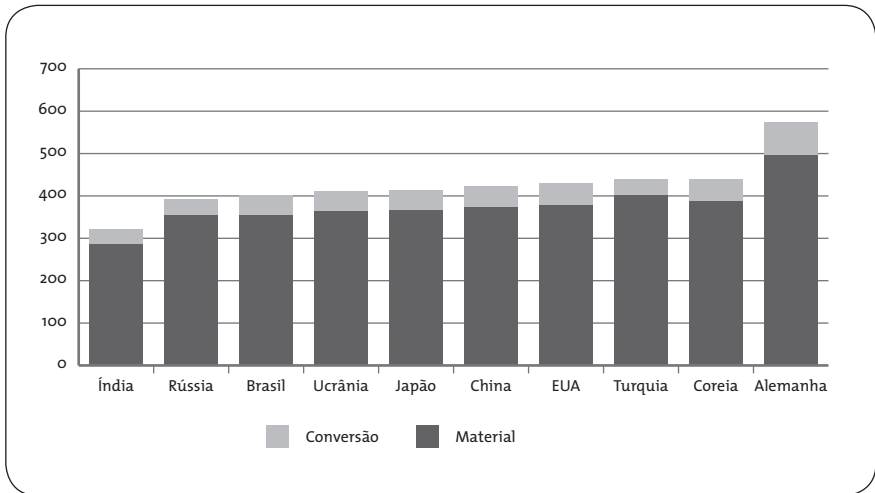


Fonte: CRU (2014).

Competitividade

Nessa etapa, a maior eficiência brasileira implica melhor posicionamento do Brasil em competitividade no mercado de bobinas a quente, com melhor posição relativa, em comparação às demais etapas de produção, inclusive quanto ao custo de conversão da placa em bobina a quente observado entre os maiores produtores.

Gráfico 14 | Custo operacional de produção de bobinas a quente: dez maiores países produtores (em US\$/t)



Fonte: CRU (2014c).

Entre os fatores da competitividade brasileira, além da replicação do custo da carga ferrosa até o fim do processo produtivo, aqui na forma de placas, verifica-se o baixo coeficiente do consumo de placas, que, embora apresente pequenas variações entre os produtores, representa economia significativa, dada a magnitude do preço de placas em relação aos demais custos envolvidos no processo.

Países como Coreia do Sul e Japão apresentam custos de conversão mais baixos que os observados no Brasil, com base, principalmente, nas menores taxas de consumo e, portanto, na maior eficiência da produção. Isso revela espaço para avanços e aperfeiçoamento também no processo de laminação, a despeito do custo baixo total de produção de bobinas a quente observado no país. Entre as alternativas para ganhos de eficiência, vale destacar: utilização de gás de BOF em fornos de reaquecimento em substituição ao

gás natural e de tecnologias de controle e maior automação dos processos, com economia de consumo de energia e conseqüente redução de emissões.

Por fim, a atual situação das usinas integradas brasileiras ainda permite uma série de avanços para promover eficiência e ganho de competitividade nas diversas etapas de produção, o que deverá ser mais urgente num cenário futuro de preços relativos mais elevados de energia.

Eficiência e competitividade da produção em *minimills* (EAF)

Em 2013, o Brasil produziu 8.570 mil t de aço líquido em *minimills* a partir do uso do EAF. Esse aço líquido produzido é integralmente destinado à produção de laminados longos, incluindo aços longos especiais e tubos sem costura. Por apresentarem menor escala de produção e fazerem elevado uso de sucata, as *minimills* são localizadas de forma mais distribuída no território nacional.

A participação da produção de aço via EAF na produção total brasileira é de cerca de 24%. Entre os países com maior participação dessa rota, destacam-se os Estados Unidos, a Índia e a Coreia do Sul, com produção via EAF destinada inclusive a laminados planos, geralmente produzidos a partir de usinas integradas.

Quanto à sustentabilidade, a produção via EAF é uma rota muito mais limpa que a rota integrada, pois parte da utilização, principalmente, de sucata ferrosa para a produção e o refino de aço líquido. A utilização de sucata, além de retirar o material descartado do ambiente, permite a recuperação da energia empregada na produção desse material, que, devolvido ao processo de produção do aço, elimina o volume de energia e de emissões envolvido nas etapas necessárias à produção do ferro primário (ferro-gusa), englobadas pelas usinas integradas.

Etapa de produção de aço líquido (EAF)

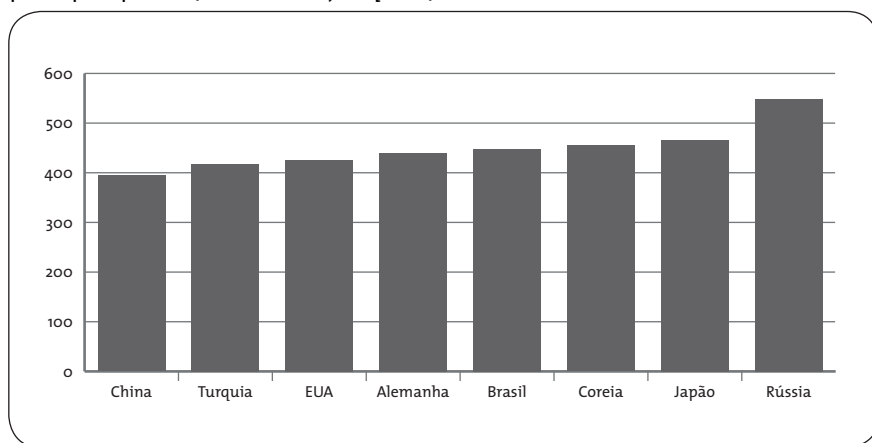
Para a transformação e o refino de uma composição de sucata e ferro primário em aço líquido, a carga é fundida a temperaturas elevadas, alcançadas com o uso intensivo de energia elétrica. Portanto, apesar do menor volume de energia total empregada, a produção do aço líquido via EAF é a etapa mais intensiva em energia elétrica na siderurgia. Como já mencionado, trata-se de uma etapa com baixo volume de emissões, com destaque para as emissões indiretas, determinadas pela matriz energética local.

Dos dez maiores produtores de aço, não há dados de *minimills* (EAF) na Índia e na Ucrânia, posicionadas entre os países de menor custo no mercado mundial, razão pela qual não integram as análises acerca dessa etapa de produção.

Os principais insumos envolvidos no processo são: carga metálica (composição de sucata e ferro primário) e eletricidade.

De forma semelhante à produção de aço líquido via BOF, há pouca variação nos níveis de consumo de carga metálica nessa etapa. No entanto, quanto à composição da carga, vale destacar a participação de pelotas de redução direta na Rússia, beneficiada a partir do gás natural abundante, além da utilização de sucata de forma exclusiva nos Estados Unidos e na Alemanha, e quase exclusivamente na Turquia e na Coreia.

Gráfico 15 | Consumo de eletricidade na produção de aço líquido via EAF: principais países (em kWh/t aço líquido)



Fonte: CRU (2014c).

A indústria brasileira apresenta um consumo de eletricidade em linha com indústrias de reconhecida eficiência, como a coreana e a alemã. Turquia e Estados Unidos, países especializados na produção via EAF, apresentam taxas de consumo mais baixas, enquanto o consumo neste estudo relativo à China se refere a usinas relativamente novas, que entraram em operação na década de 2000 e contemplam tecnologias recentes de controle de processos.

A indústria norte-americana pode ser considerada uma das mais eficientes em produção via EAF, tendo promovido uma grande expansão de sua

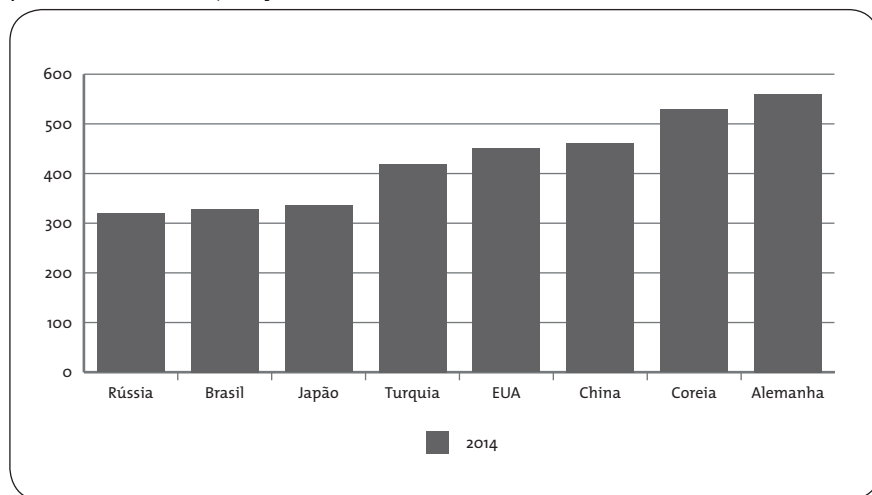
participação na produção total de aço. Nos últimos vinte anos, a produção via EAF saltou de 40% para 60% da produção total, índice registrado em 2013. Trata-se de uma indústria com baixas taxas de consumo de seus principais insumos, carga metálica, eletricidade, ferroligas, além de ocupar o menor número de trabalhadores no processo.

A eficiência observada nas usinas dos Estados Unidos pode ser explicada pela difusão das diversas tecnologias de controle e automação da produção, envolvendo acompanhamento e ajuste minucioso dos parâmetros de processo em tempo real, servindo, portanto, de referência para a promoção de avanços e aperfeiçoamento nos processos praticados no Brasil.

Competitividade

A exemplo do verificado na indústria integrada, o custo da carga metálica também é o maior determinante de competitividade na produção de aço líquido via EAF, representando, em média, cerca de 70% do custo total de produção.

Gráfico 16 | Custo operacional de produção de aço líquido via EAF: principais países (em kWh/t aço líquido)



Fonte: CRU (2014c).

A indústria brasileira está posicionada entre os menores custos de produção, o que reflete os preços relativamente baixos de carga metálica, tanto de ferro-gusa quanto, principalmente, de sucata. Portanto, o bom posicionamento

em custo total de produção da indústria brasileira não deve ser confundido com uma maior eficiência de seus processos de produção.

A análise revela que o Brasil ocupa posição mediana quando se comparam os custos de conversão da carga metálica em aço líquido, superior a Estados Unidos, Turquia e China. Os Estados Unidos têm o menor custo de conversão, o que retrata a eficiência e as tecnologias aplicadas a seus processos produtivos.

Produção de laminados longos: vergalhão

No Brasil, a maior parcela de laminados longos é produzida em *minimills*, a partir do aço líquido de aciarias elétricas (EAF). Em 2013, a produção de aços laminados longos, incluindo a produção de tubos sem costura e de aços especiais, chegou a 11.250 mil t. Com uma capacidade instalada de 15,6 milhões no mesmo ano, os produtores brasileiros operaram com uma taxa de utilização média em torno de 72%.

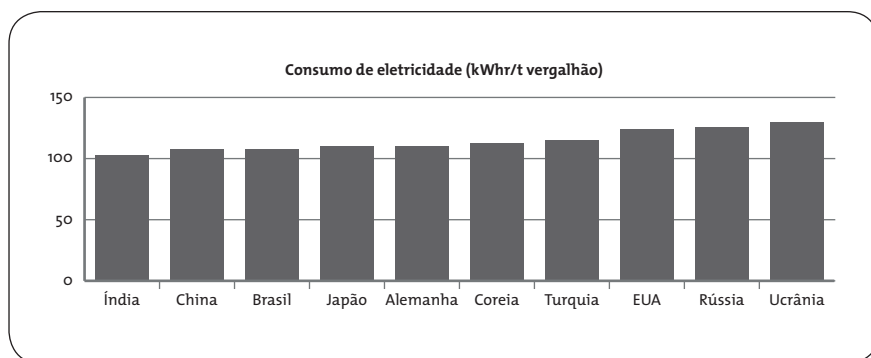
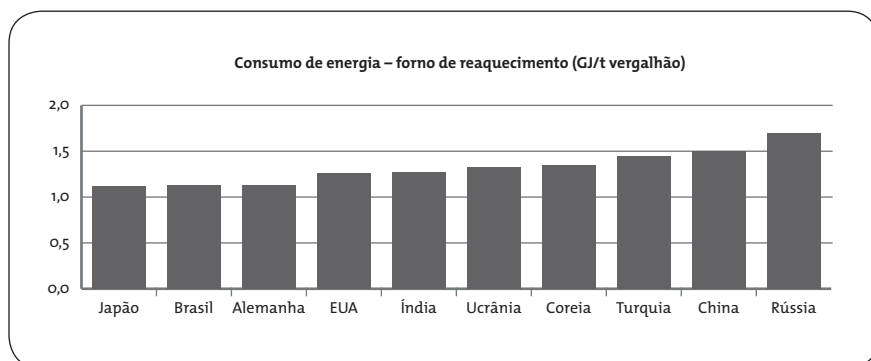
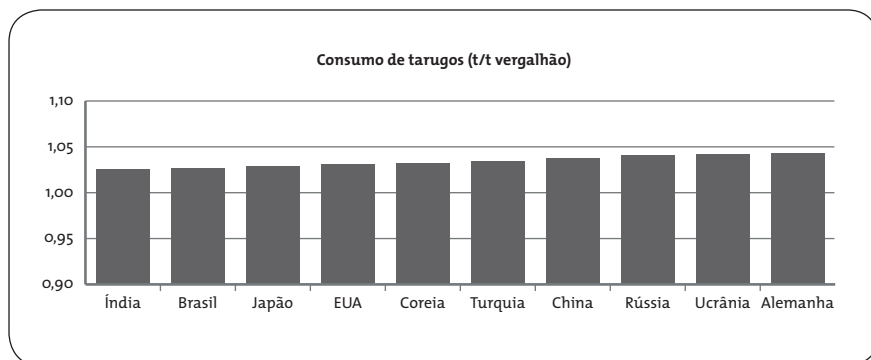
Na indústria brasileira de aços longos, cinco grupos – Gerdau, Arcelor-Mittal, Votorantim, Vallourec e Sinobras – respondem pela operação de 17 unidades, localizadas nas regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Sul do país. A Região Centro-Oeste já conta com uma unidade de laminação de longos, a Sitrel, uma parceria entre a Votorantim Siderurgia e o Grupo Grendene. Os maiores produtores brasileiros de longos são Gerdau e Arcelor Mittal, detendo cerca de 52% e 28%, respectivamente, da capacidade produtiva apurada em 2013.

Apesar da taxa de utilização abaixo da média histórica, o mercado prevê elevação da capacidade de produção de vergalhões e fio-máquina entre 2014 e 2015, com destaque para as operações de novos entrantes, que poderão promover uma adição de capacidade de 1,75 milhão de toneladas.

O excesso de capacidade que atualmente caracteriza a siderurgia mundial, conjugado à entrada em operação de novos entrantes, acirra a concorrência no mercado brasileiro e contribui para um movimento maior das empresas em busca por ganhos de eficiência e redução de custos.

O processo de laminação de longos não difere muito da laminação de planos, apresentando taxas equivalentes de consumo de carga metálica (tarugos), energia e eletricidade. O Brasil se apresenta relativamente mais eficiente quanto à laminação de longos, em comparação com a indústria de laminados de planos, conforme observado a seguir.

Gráficos 17, 18 e 19 | Taxas de consumo dos principais insumos da laminação de vergalhão



Fonte: CRU (2014c).

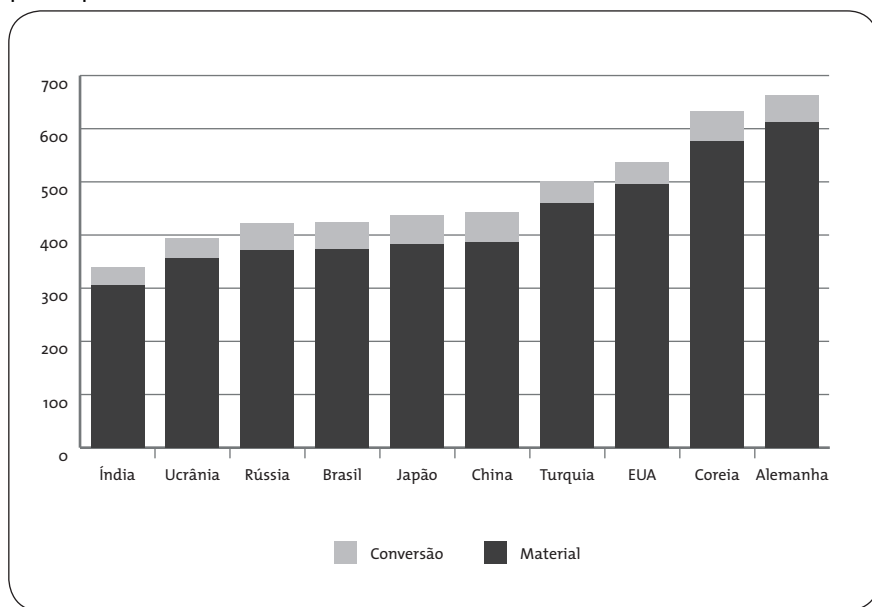
A relativa eficiência observada nas taxas de consumo acima pode ser explicada pela recente implantação de unidades de laminação no Brasil, as quais contemplam tecnologias eficientes de controle e automação da produção. A capacidade de produção brasileira de vergalhões mais que dobrou

nos últimos dez anos, com adição robusta entre 2006 e 2010 e novas adições em 2013 e 2014.

Competitividade

Na comparação entre os dez maiores produtores de aços longos, o Brasil é o país que, atualmente, apresenta o quarto menor custo médio de produção, perdendo somente para Índia, Ucrânia e Rússia, como observado no Gráfico 20.

Gráfico 20 | Custo operacional de produção de vergalhões: dez maiores países produtores



Fonte: CRU (2014c).

A vantagem dos produtores brasileiros recai, em geral, sobre os custos dos insumos metálicos. Os produtores brasileiros contam com o terceiro menor custo de insumos metálicos do mundo. No caso da laminação de longos, o Brasil também conta com taxas eficientes de consumo dos principais insumos.

Na comparação com *minimills* de baixo custo produtoras de longos dos dez principais produtores mundiais, as usinas brasileiras se destacam entre as mais competitivas.

Após o custo de carga metálica, o custo de eletricidade seria um dos mais representativos na produção brasileira de longos, em geral a partir de *minimills* (EAF). A análise considera energia elétrica de contratos assinados em anos anteriores, entre os menores preços do mundo.

Portanto, apesar do quadro confortável apurado nesta análise, o cenário atual de substancial elevação dos preços de energia elétrica deverá impactar significativamente os custos de produção de longos no Brasil. Esse cenário poderá conduzir a uma elevação da participação das usinas integradas na produção de laminados longos (a exemplo do movimento atual da CSN), com aproveitamento do potencial gerador de energia dessa usina.

Possibilidades tecnológicas voltadas à eficiência energética e à redução de emissões de GEE

Conforme já mencionado, a produção de aço é realizada principalmente em usinas integradas a coque. Atualmente, a produção integrada a coque na China – maior produtor mundial de aço – chega a representar, aproximadamente, 82% da produção siderúrgica.

Na produção de aço a partir do ferro primário oriundo do AF, a rota mais amplamente utilizada é a conversão a oxigênio LD/BOF. Na China, cujo grande volume de investimentos na siderurgia ocorreu apenas nos últimos 15 anos, a utilização de conversores LD/BOF chega a 92% da produção de aço carbono, inclusive para a produção de aços longos, cuja rota mais comumente usada é a produção via EAF. A China deve apresentar uma taxa ligeiramente diferenciada de crescimento na produção de aço via rota EAF nos próximos anos, por questões ambientais, porém a rota de produção a partir de altos-fornos continuará com altíssima predominância.

No mundo, a produção de aço a partir de conversores LD/BOF chegou a 71,7% em 2013. No Brasil, 73,3% da produção de aço, nesse ano, se deve à rota LD/BOF.

Segundo projeções da CRU, até pelo menos 2025, a produção de aço através do LD/BOF deverá ficar na faixa de 70% a 72%, o que revela pouca ou praticamente nenhuma mudança no perfil siderúrgico mundial de produção. O restante da produção de aço deverá continuar a ocorrer via fornos elétricos a arco (EAF), que utilizam sucata de aço e ferro primário (ferro-gusa e/ou ferro-esponja) como insumos.

Embora, nos próximos anos, o setor não apresente alteração significativa no padrão de produção do aço, conforme já visto, algumas tecnologias alternativas voltadas à redução (mais eficientes, mais flexíveis e com menores emissões de CO_2) têm-se mostrado importantes, particularmente no fornecimento de unidades de ferro primário para *minimills* e na reciclagem de resíduos siderúrgicos, podendo-se citar as seguintes:

1. **Fusão-redutora (*bath smelting*)** – Nela, os óxidos de ferro, dissolvidos em banhos metálicos e/ou em escórias líquidas, são rapidamente reduzidos pelo carbono, produzindo o metal líquido (ferro primário líquido);
2. **Redução sólida (leitos fluidizado e fixo)** – Através de reações gás-sólido, gases redutores (H_2 , CO) promovem a redução dos óxidos, produzindo o ferro-esponja;
3. **Autorredução** – A reação do tipo sólido-sólido ocorre a partir dos intermediários gasosos no interior dos aglomerados (finos de minério e materiais carbonosos), produzindo metal líquido ou ferro-esponja. O contato íntimo entre as partículas e a ausência de N_2 resulta em reações muito rápidas e energeticamente eficientes.

Entre as diversas tecnologias de redução sólida, destaca-se a tecnologia Midrex, já mencionada, que utiliza gás natural e deverá elevar, nos próximos anos, sua produção nos Estados Unidos (em razão do aumento da produção de *shale gas*) e no Oriente Médio, principalmente no Irã e na Arábia Saudita.

Entre as tecnologias de autorredução, cabe destacar a TecnoRed. Concebida e desenvolvida no Brasil, a TecnoRed apresenta um conjunto de vantagens: (i) possibilidade de processamento de uma grande variedade de cargas (minérios, sucatas, cavacos etc.); (ii) baixo custo de investimento; e (iii) flexibilidade, podendo ser dimensionado a partir de módulos básicos. Essa tecnologia ainda se encontra em fase experimental no Brasil.

Sobre as alternativas tecnológicas para o aumento da eficiência energética e a redução das emissões de GEE, existem tecnologias emergentes que poderão propiciar queda mais significativa nas emissões e poderão vir a ser utilizadas no longo prazo. No âmbito do programa europeu ULCOS (Ultra-Low CO_2 Steelmaking), foram escolhidas algumas tecnologias de ruptura, a partir da colaboração das principais indústrias siderúrgicas mundiais, visando a uma redução drástica das emissões de CO_2 (pelo menos de 50%), comparativamente às melhores práticas correntes de produção de aço, entre as quais duas são sumariadas a seguir:

- **Processo eletrolítico de produção de ferro:** o uso de eletrólise na produção de aço, em intensidade energética, é similar ou um pouco abaixo do processo tradicional de produção, devendo chegar a um consumo médio de 15 GJ/t de aço líquido. Nas tecnologias atuais, esse consumo é, em média, de 20 GJ/t. A tecnologia pode ser atrativa quanto a redução de emissões de GEE se a geração de energia elétrica, fonte energética para o processo eletrolítico, tiver como fonte energia oriunda de processos de baixa emissão, como as energias alternativas ou a hidroeletricidade. Em relação ao processo propriamente dito, as opções mais promissoras são a eletrólise em meio aquoso alcalino e a piroeletrólise. Essas tecnologias, embora tecnicamente viáveis, devem levar décadas para atingir uma escala comercial.
- **Hisarna com captação e estocagem de CO₂:** tecnologia baseada em fusão-redutora (*bath smelting*). Consiste na combinação de pré-aquecimento e redução parcial em um reator de ciclones, com um reator para a redução total e consequente produção de ferro-gusa líquido. Trata-se de uma tecnologia similar à Corex, já mostrada, com a vantagem de necessitar de menos carvão, além de se mostrar mais flexível, sendo possível substituir o carvão mineral por biomassa, gás natural ou até mesmo hidrogênio.

O processo Hisarna está sendo desenvolvido na Holanda. Uma planta-piloto está em fase de testes e utiliza, adicionalmente, tecnologias de separação, captura de CO₂ e injeção do CO₂ capturado em formações geológicas apropriadas, o que diminui ainda mais as emissões de GEE.

Quanto às tecnologias que já são aplicadas ou podem vir a ser aplicadas em curto ou médio prazo (tanto pelo ganho de eficiência energética apresentado como em relação à economicidade da alternativa), expõem-se, a seguir, algumas relacionadas à produção de aço em unidades integradas a coque (incluindo os processos de preparação de carga, como a sinterização e a coqueificação), à produção via EAF e a processos comuns às duas rotas (p. ex., lingotamento/laminação), com base em EPA (2012).

Tecnologias relativas às unidades integradas a coque

Processo de sinterização

A tecnologia de *heat recovery* (recuperação de calor) na planta de sinterização pode ser usada no pré-aquecimento do ar de combustão dos

queimadores e na produção de vapor superaquecido, que pode ser usado para cogeração de energia a partir de turbinas a vapor. Essa tecnologia pode representar uma economia de cerca 0,6 GJ/t de sinter, com custo de capital aproximado de US\$ 5,00/t, com *pay-back* de cerca de três anos. O emprego dessa alternativa permite a redução de emissões de NO_x , SO_x e de particulados.

Outras opções interessantes no processo de sinterização que podem melhorar a eficiência energética e apresentam baixo custo relativo de capital e menores *pay-back* são: (i) redução de escapamento de gás na planta, com consequente redução do consumo de energia elétrica dos ventiladores do forno; (ii) aprofundamento do leito de sinterização, com consequente aumento na produtividade e na redução do consumo energético e de emissões; (iii) implantação de sistemas automatizados de monitoramento e controle do processo, resultando em até 5% de redução do consumo energético; e (iv) aproveitamento de resíduos energéticos de outros processos, na planta de sinterização, como o óleo residual do processo de laminação a frio.

Processo de coqueificação

Uso de sistemas computadorizados para controle de temperatura nas coquearias, regulando-se em função da necessidade, em vez do uso de aquecimento constante (convencional), o que pode representar um consumo de combustível em até 10% a partir da otimização do suprimento. Ainda é possível citar outras tecnologias com baixo custo de capital e energo-eficientes, como: (i) uso do *heat recovery* (recuperação de calor) nas baterias de coque, que pode ser usado no pré-aquecimento do ar para os queimadores; e (ii) técnica de apagamento a seco do coque, que, além de permitir, a partir do equipamento usado, melhor taxa de recuperação dos gases, reduz o consumo de coque no alto-forno (melhora do rendimento do coque), pelas características do coque obtido nesse procedimento.

Alto-forno (AF) e aciaria LD/BOF

No AF, o aumento da injeção de PCI pode representar redução na produção de coque, resultando na diminuição de uma grande quantidade de energia consumida nesse processo, que pode chegar até cerca de 0,8 GJ/t de ferro-gusa. O aumento do PCI também propicia queda dos custos operacionais no processo de redução no AF.

Nessa etapa, ainda é possível aumentar a injeção de gás de coquearias (GCO) e da aciaria (GAC) no AF, o que promove a redução de emissões de

CO₂. Cabe destacar que há um limite técnico de injeção de GCO, que é de 0,1 t/t de ferro-gusa líquido.

Outras tecnologias que visam à redução do consumo energético podem ser enumeradas, como: (i) recuperação de gás de alto-forno; (ii) recuperação de calor da aciaria e aumento da recuperação de gás de BOF; (iii) sistemas de controle e automação da reciclagem do GAF; (iv) recuperação de calor da escória.

No Anexo II, traz-se uma tabela com algumas tecnologias que podem proporcionar ganhos de eficiência energética nas unidades integradas a coque, levando-se em consideração as principais etapas envolvidas na produção de aço, com indicadores selecionados de redução de emissões, economia de energia, custo de capital e tempo de retorno dos investimentos.

Tecnologias relativas às unidades semi-integradas com base em EAF

Na produção de aço via EAF, merecem destaque:

1. uso de transformadores de alta potência, cujo custo de capital é de cerca de US\$ 400.000/forno elétrico, podendo reduzir o consumo de energia elétrica em até 15 kWh/t;
2. uso de escória espumante, obtida a partir da injeção de carbono (na forma de carvão granular) e oxigênio, cujo capital estimado é de cerca de US\$ 16,00/t de aço líquido, promovendo aumento de até 20% na eficiência elétrica, com uma redução de até 7,0 kWh/t de aço no consumo energético;
3. uso de corrente contínua (DC), em vez de corrente alternada (AC), com eletrodo único, o que permite redução de até 5% no consumo de energia elétrica. Essa tecnologia está limitada a novas instalações, pelos altos custos de adaptação dos fornos de corrente alternada;
4. pré-aquecimento de sucata com alimentação contínua do forno elétrico, reduzindo o consumo de energia elétrica em até 50 kWh/t de aço. Essa tecnologia já está sendo usada pelo Grupo Gerdau na unidade de Charlotte, NC, EUA; e
5. uso de redes neurais no controle de variáveis do processo em tempo real, como temperatura do banho de aço, teor de carbono do aço, injeção de oxigênio, monitoramento dos gases de exaustão etc.

No Anexo III, há uma tabela com algumas tecnologias que podem proporcionar ganhos de eficiência energética na produção de aço via EAF, mostrando indicadores selecionados de redução de emissões, economia de energia, custo de capital e tempo de retorno dos investimentos.

Processos comuns às duas rotas

Além das tecnologias descritas, existem as seguintes:

1. Aumento da eficiência do lingotamento contínuo a partir do uso de tecnologia *near net shape casting*, que consiste no lingotamento do metal em uma forma já bem próxima do produto final, reduzindo, assim, as etapas de laminação. Nessa tecnologia, o metal lingotado passa diretamente ao laminador a quente, eliminando-se as etapas de resfriamento e posterior reaquecimento para a laminação. Alguns processos que empregam a tecnologia *near net shape casting* têm sido desenvolvidos pela indústria, notadamente no que se refere ao lingotamento de placas menos espessas e de laminados de tiras a quente. Cabe destacar que se trata de uma tecnologia de uso ainda limitado a alguns formatos de produtos. Estima-se, com o uso dessa tecnologia, reduzir o consumo energético da ordem de 5,0 GJ/t de aço bruto, com investimentos de cerca de US\$ 240,00/t de aço bruto e *pay-back* estimado de 3,3 anos.
2. Aumento da eficiência de preaquecimento de semiacabados para a laminação, a partir de sistemas mais efetivos de monitoramento e controle.
3. Uso de motores de corrente alternada mais eficientes nos processos de laminação, tanto na laminação a quente como a frio.
4. Outras tecnologias, como: sistemas de monitoramento de eficiência do uso de energia; encapsulamento de fornos; aproveitamento do calor dos produtos; uso de *walking beam furnace* para o preaquecimento de semiacabados para a laminação.

No Anexo IV, encontra-se uma tabela com algumas tecnologias que podem proporcionar ganhos de eficiência energética nos processos siderúrgicos comuns às duas rotas anteriormente apresentadas, mostrando indicadores selecionados de redução de emissões, economia de energia, custo de capital e tempo de retorno dos investimentos.

Oportunidades e perspectivas

Este estudo evidencia oportunidades de ganho de eficiência nas diversas etapas do processo de produção do aço, com destaque para a adoção de tecnologias e medidas de promoção de eficiência energética e redução de emissões. A indústria brasileira é composta por conjuntos de usinas com graus diferentes de eficiência, com oportunidades de investimento e avanço em seus processos de produção.

Mundialmente, as empresas têm buscado desenvolver métodos e tecnologias de produção cada vez mais limpos e eficientes, visando à redução do consumo de energia e de emissões. A pressão exercida para se reduzir a emissão global de GEE impõe à siderurgia, maior emissor industrial, uma agenda de contínuo desenvolvimento e a adoção de novos processos e sistemas voltados a uma indústria de baixo carbono.

O atual cenário de excesso de capacidade produtiva e elevação dos custos de energia torna o avanço dos processos e das tecnologias uma questão ainda mais urgente para a sustentabilidade individual das usinas no mercado global.

O estudo destaca as indústrias da Coreia do Sul e dos Estados Unidos como de elevada eficiência na produção, o que se revela pelas baixas taxas relativas de consumo dos principais insumos. A indústria brasileira se beneficia do custo baixo de carga metálica e se posiciona relativamente bem em competitividade. No entanto, a observação de taxas mais baixas de consumo em indústrias submetidas a condições menos favoráveis quanto a disponibilidade e custo de determinados insumos revela espaços para ganhos de eficiência na siderurgia brasileira, a partir da implementação contínua de melhores sistemas e tecnologias de processo.

Entre os diagnósticos feitos ao longo deste estudo, destaca-se a capacidade de autoprodução de energia elétrica das usinas siderúrgicas integradas, as quais têm potencial para a produção líquida de energia elétrica com reaproveitamento de gases e calor de processo, a exemplo do que já fazem a CSA e a CST. O aproveitamento de todo esse potencial energético ainda não é uma realidade em toda a indústria brasileira, que deverá promover os investimentos necessários para que isso ocorra, principalmente no atual cenário de elevação do custo de energia elétrica.

Enquanto algumas usinas brasileiras mantêm planos de investimento em busca de processos mais eficientes, redução de custos, e de construção

de estrutura mais competitiva, outras têm adiado investimentos importantes em sustentabilidade e deverão cada vez mais sofrer o impacto negativo sobre os resultados.

O momento atual vivenciado pela indústria brasileira, marcado por uma grande elevação de preços de energia, principalmente da energia elétrica, e também pela elevação de salários, deverá mover usinas para um patamar mais elevado de eficiência e produtividade, que somente será possível se cumprir-se a agenda de investimentos seguida pelas usinas mais avançadas, com base na avaliação e na adoção de algumas das tecnologias promotoras de eficiência apresentadas no capítulo anterior.

As possibilidades de atuação do BNDES

O BNDES conta com programas e linhas facilitadas para que as empresas realizem a agenda de investimentos necessária às usinas siderúrgicas brasileiras que ainda deverão adotar tecnologias e processos viáveis para a redução no consumo de energia e emissões.

Além das linhas mais tradicionais de apoio à indústria e à aquisição de bens de capital, o BNDES oferece uma linha específica, Apoio a Projetos de Eficiência Energética (Proesco). Trata-se de uma linha voltada, até mesmo, ao financiamento de usuários finais de energia, visando à realização de intervenções que comprovadamente contribuam para a economia de energia, aumentem a eficiência global do sistema energético ou promovam a substituição de combustíveis de origem fóssil por fontes renováveis. Com um dos mais baixos custos financeiros e elevada participação do investimento, esse seria um dos produtos mais adequados.

Os investimentos em sistemas voltados à redução do consumo de energia e de emissões também podem ser financiados na linha de Meio Ambiente, que tem condições semelhantes ao Proesco.

Atualmente, as empresas contam com taxas de financiamento de até 7,1% para aquisição de máquinas e equipamentos novos e prazo de até oito anos para pagamento, incluídos até dois anos de carência.

Por se tratar de um setor prioritário do Plano Setorial para Redução das Emissões da Indústria, projetos que efetivamente reduzam as emissões de GEE na siderurgia também podem ser apoiados pelo Fundo Clima, que

conta com condições ainda mais favoráveis de crédito, em alguns casos, inclusive, com custo financeiro inferior a 2% a.a.

O Programa Fundo Clima, em seu subprograma Gestão e Serviço de Carbonos, também contempla o apoio à elaboração de inventários e projetos para a medição de emissões de GEE, em linha com o programa brasileiro GHG Protocol. Já elaboraram inventários as empresas ArcelorMittal Brasil – CST (2008), CSN (2013) e CSA (2013), e essa prática deve ser difundida para todo o setor.

Por fim, o BNDES, além de prover recursos financeiros para o desenvolvimento contínuo do setor, pode desempenhar relevante papel de articulação com instituições e associações representativas, indústrias siderúrgicas e consumidoras de aço, além de agentes de pesquisa, a fim de orientar políticas e ações destinadas ao desenvolvimento sustentável e ao fortalecimento da cadeia do aço.

Conclusões

Nos últimos anos, a indústria siderúrgica brasileira apresentou parâmetros de sustentabilidade alinhados com a recente evolução da siderurgia mundial, tendo obtido importante redução do consumo total de energia (GJ/t), a uma taxa média de 1,15% a.a. de 2004 a 2013, explicada pela adoção de medidas e tecnologias mais eficientes, principalmente com a entrada de plantas em operação mais recente.

A comparação com os dez maiores países produtores revela que o Brasil apresenta taxas relativamente baixas de consumo de energia e de seus principais insumos, não se tratando, porém, de realidade comum a toda a indústria brasileira. Algumas usinas têm adiado investimentos importantes e operado aquém quanto a sustentabilidade e eficiência produtiva, evidenciadas pelos dados de produção das indústrias da Coreia do Sul e dos Estados Unidos, notadamente mais eficientes. Para alcançar patamar mais elevado de eficiência e produtividade, considerando o cenário de maior competição global, essas usinas precisam executar uma importante agenda de investimentos em tecnologias promotoras de eficiência.

Anexo I | Consumo energético de usinas brasileiras típicas

Usina integrada, produtora de planos – consumo energético – 2013			
	Consumo energético*	Consumo de energia elétrica	Carvão
	GJ/t produto	kWh/t produto	kg/t produto
Coqueria	3,06	25,00	-
Sinterização	0,03	34,00	47,00
Alto-forno	1,90	71,00	472,00
BOF	0,10	30,00	-
Placas	0,12	11,99	-
LTQ	1,34	94,31	-
Total	21,02	1.169,46	2.631,10
MGJ	21,02	4,21	78,93
kWh	5.839,86	1.169,46	21.925,85
GWh	5,84	1,17	21,93
Total de energia consumida em GJ/t de aço bruto			20,42
Usina integrada, produtora de longos – consumo energético – 2013			
	Consumo energético*	Consumo de energia elétrica	Carvão
	GJ/t produto	kWh/t produto	kg/t produto
Sinterização	0,2	23,0	51,0
Alto-forno	1,9	71,0	521,3
Aciaria BOF	0,1	50,0	-
Tarugo	0,0	16,0	-
Fio-máquina	1,2	117,0	-
Total	4,49	373,10	780,75
MGJ	4,5	1,3	23,4
kWh	1.246,5	373,1	6.506,3
GWh	1,2	0,4	6,5
Total de energia consumida em GJ/t de aço bruto**			21,67

(Continua)

(Continuação)

Usina semi-integrada, produtora de longos – consumo energético – 2013			
	Consumo energético*	Consumo de energia elétrica	Carvão
	GJ/t produto	kWh/t produto	kg/t produto
Aciaria EAF	0,30	466,00	28,99
Tarugo	0,15	15,00	0,00
Vergalhão	1,12	110,00	0,00
Fio-máquina	1,12	112,00	0,00
Seções	1,27	117,00	0,00
Total	2,29	818,01	39,43
MGJ	2,29	2,94	1,18
kWh	635,23	818,01	328,55
GWh	0,64	0,82	0,33
Total de energia consumida em GJ/t de aço bruto**			4,86

* Consumo de energia de todas as fontes excluindo-se a energia elétrica e a do carvão mineral.

** No caso de unidade semi-integrada, a parcela referente à energia consumida no processo de redução não está incluída. Essa energia é computada no processo de produção de ferro-gusa.

Anexo II | Tecnologias aplicadas a unidades integradas de produção de aço – eficiência energética: indicadores selecionados

Tecnologia	Redução de emissões	Economia de energia elétrica	Economia de energia – outras fontes	Custo de capital	Pay-back time
Sinterização	1- Uso de tecnologia de <i>heat recovery</i>	Desprezível	Alta – 0,55 GJ/t de sinter	Médio – US\$ 4,7/t de sinter	Curto – 2,8 anos
	2- Redução de escapamento de gás	Desprezível	Desprezível	Baixo – US\$ 0,14/t de sinter	Curto – 1,3 ano
	3- Aprofundamento do leito de sinterização	Desprezível	Baixa – 0,09 GJ/t de sinter	Baixo – US\$ 0,01/t de sinter	Curto – 0,1 ano
	4- Melhoria dos processos de automação e controle	Desprezível	Baixa – 0,05 GJ/t de sinter	Baixo – US\$ 0,21/t de sinter	Curto – 1,4 ano
	5- Uso de óleos residuais de outros processos	Desprezível	Média – 0,18 GJ/t de sinter	Baixo – US\$ 0,29/t de sinter	Curto – 0,5 ano
Coqueificação	1- Uso de sistemas para controle de mistura do carvão	Desprezível	Alta – 0,30 GJ/t de coque	Muito alto – US\$ 77/t de coque	Curto – 2,8 anos
	2- Sistemas para controle de temperatura do processo	Desprezível	Alta – 0,30 GJ/t de coque	Muito alto – US\$ 77/t de coque	Muito longo > 30 anos
	3- Compressor de GCO com velocidade controlada	Desprezível	Alta – 1,2 GJ/t de coque	Baixo – US\$ 0,47/t de coque	Muito longo > 20 anos
	4- Apagamento a seco do coque	Desprezível	Alta – 0,30 GJ/t de coque	Muito alto – US\$ 110/t de coque	Muito longo > 30 anos

(Continua)

(Continuação)

Tecnologia	Redução de emissões	Economia de energia elétrica	Economia de energia – outras fontes	Custo de capital	Pay-back time
1- Aumento da injeção de PCI para até 225 kg/t	Alta – até 35 kg CO ₂ /t de gusa	Desprezível	Alta – 0,57 GJ/t de gusa	Médio – US\$ 8,0/t de gusa	Curto – 2,4 anos
2- Aumento da injeção de gás natural para até 140 kg/t	Alta – até 55 kg CO ₂ /t de gusa	Desprezível	Alta – 0,90 GJ/t de gusa	Médio – US\$ 7,8/t de gusa	Curto – 1,5 ano
3- Recuperação do gás de alto-forno	Baixa – até 4 kg CO ₂ /t de gusa	Desprezível	Baixa – 0,07 GJ/t de gusa	Baixo – US\$ 0,47/t de gusa	Curto – 0,8 ano
4- Uso de turbina de topo úmida	Média – até 18 kg CO ₂ /t de gusa	Baixa – 0,11 GJ/t de gusa	Nenhuma	Alto – US\$ 32/t de gusa	Muito longo > 20 anos
5- Automação do processo de preaquecimento do ar de injeção	Média – até 22 kg CO ₂ /t de gusa	Desprezível	Alta – 0,37 GJ/t de gusa	Baixo – US\$ 0,47/t de gusa	Curto – 0,4 ano
6- Melhoria dos sistemas de automação e controle	Média – até 25 kg CO ₂ /t de gusa	Desprezível	Alta – 0,40 GJ/t de gusa	Baixo – US\$ 0,56/t de gusa	Curto – 0,4 ano
BOF					
1- Tecnologia de recuperação de gás de aciaria mais eficiente	Alta – até 46 kg CO ₂ /t de aço	Desprezível	Alta – 0,55 GJ/t de aço	Alto – US\$ 34,4/t de aço	Longo – 12 anos
2- Ventiladores com velocidade variáveis controladas (VSD)	Baixa – até 0,6 kg CO ₂ /t de aço	Desprezível	Baixa – 0,03 GJ/t de aço	Baixo – US\$ 0,31/t de aço	Médio – 8 anos

Anexo III | Tecnologias aplicadas à produção de aço via EAF – eficiência energética: indicadores selecionados

Tecnologia	Redução de emissões	Economia de energia elétrica	Economia de energia – outras fontes	Custo de capital	Pay-back time
1- Processos de automação e controle com uso de redes neurais	Alta – até 18 kg CO ₂ /t de aço	Média – 0,11 GJ/t de aço	Desprezível	Baixo – US\$ 1,5/t de aço	Curto – 0,5 ano
2- Transformadores de ultra-alta-potência	Média – até 10 kg CO ₂ /t aço	Baixa – 0,06 GJ/t de aço	Desprezível	Médio – US\$ 4,3/t de aço	Médio – 5,2 anos
3- Injeção de gás inerte para aumento da transferência de calor	Média – até 12 kg CO ₂ /t aço	Baixa – 0,07 GJ/t de aço	Desprezível	Baixo – US\$ 0,94/t de aço	Curto – 0,2 ano
4- Uso de escória espumante	Média – até 11 kg CO ₂ /t aço	Baixa – 0,07 GJ/t de aço	Desprezível	Alto – US\$ 15,6/t de aço	Médio – 4,2 anos
5- Queimadores oxy-fuel	Alta – até 24 kg CO ₂ /t aço	Média – 0,14 GJ/t de aço	Desprezível	Médio – US\$ 7,5/t de aço	Curto – 0,9 ano
6- Forno a corrente contínua (DC)	Alta – até 53 kg CO ₂ /t aço	Alta – 0,32 GJ/t de aço	Desprezível	Médio – US\$ 6,1/t de aço	Médio – 9,2 anos
7- Preaquecimento de sucata	Alta – até 35 kg CO ₂ /t aço	Alta – 0,22 GJ/t de aço	Desprezível	Médio – US\$ 7,8/t de aço	Médio – 8,0 anos
8- Monitoramento e controle dos ventiladores de gases de combustão	Média – até 9 kg CO ₂ /t aço	Baixa – 0,05 GJ/t de aço	Desprezível	Baixo – US\$ 3,1/t de aço	Curto – 4,3 anos
9- Furo excêntrico na carcaça do forno para vazamento de escória	Média – até 9 kg CO ₂ /t aço	Baixa – 0,05 GJ/t de aço	Desprezível	Baixo – US\$ 5,0/t de aço	Médio – 6,8 anos

Anexo IV | Tecnologias aplicadas a processos comuns às duas rotas – eficiência energética: indicadores selecionados

Tecnologia	Redução de emissões	Economia de energia elétrica	Economia de energia – outras fontes	Custo de capital	Pay-back time
1- Lingotamento tipo <i>near net shape</i>	Muito alta – até 730 kg CO ₂ /t de aço	Alta – 0,64 GJ/t de aço	Muito alta – 3,5 GJ/t de aço	Muito alto – US\$ 235/t de aço	Curto – 3,3 anos
2- Controle de processo nos laminadores de tiras a quente (LTQ)	Média – até 15,0 kg CO ₂ /t de aço	Desprezível	Alta – 0,3 GJ/t de aço	Baixo – US\$ 1,1/t de aço	Curto – 1,2 ano
3- Queimadores mais eficientes com sistemas de regeneração e recuperação de gases	Alta – até 35,2 kg CO ₂ /t de aço	Alta – 0,70 GJ/t de aço	Desprezível	Baixo – US\$ 3,9/t de aço	Curto – 1,8 ano
4- Controle de oxigênio do sist. de ventilação de ar de combustão com uso de VSD	Média – até 17,0 kg CO ₂ /t de aço	Desprezível	Alta – 0,33 GJ/t de aço	Baixo – US\$ 0,79/t de aço	Médio – 0,8 ano
5- Recuperação de calor da água de resfriamento do LTQ para geração de vapor	Baixa – até 1,9 kg CO ₂ /t de aço	Desprezível	Baixa – 0,03 GJ/t de aço	Baixo – US\$ 1,3/t de aço	ND
6- Recuperação de calor de fornos das linhas de tratamento térmico	Média – até 17,5 kg CO ₂ /t de aço	Baixa – 0,02 GJ/t de aço	Alta – 0,30 GJ/t de aço	Médio – US\$ 4,2/t de aço	Curto – 4,0 anos
7- Dispositivos para redução de perdas por evaporação de ácido nas linhas de decapagem	Média – até 9,9 kg CO ₂ /t de aço	Desprezível	Média – 0,20 GJ/t de aço	Médio – US\$ 4,4/t de aço	Médio – 7,3 anos
8- Sistemas de monitoramento automático e de metas em laminadores a frio	Alta – até 35,3 kg CO ₂ /t de aço	Desprezível	Média – 0,21 GJ/t de aço	Baixo – US\$ 1,7/t de aço	Curto – 0,8 ano

Lingotamento e laminação

Referências

- CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Recomendações para inovação tecnológica na siderurgia do Brasil*. 2009. Disponível em: <http://www.abmbrasil.com.br/epss/arquivos/documentos/2011_4_18_16_58_57_43153.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2014.
- COSTA, M. M. *Princípios de ecologia industrial aplicados à sustentabilidade ambiental e aos sistemas de produção de aço*. 2002. 257 p. Tese (D.Sc., Planejamento Energético) – Coppe/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- CRU INTERNATIONAL. *Crude Steel Market Outlook*. CRU, 2014a.
- _____. *Steel Long Products Market Outlook*. CRU, 2014b.
- _____. *Steel Cost Model 2014*. CRU, 2014c.
- EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from the iron and steel industry*. 2012. Disponível em: <<http://www.epa.gov/nsr/ghgdocs/ironsteel.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2014.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanco energético nacional 2014: ano-base 2013*. Rio de Janeiro, 2014.
- IABR – INSTITUTO AÇO BRASIL. *Relatório de sustentabilidade 2013*. 2013. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/relatorio_sustentabilidade_2013v3.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2014.
- _____. *Anuário estatístico 2014*. Rio de Janeiro, 2014a.
- _____. *Relatório de sustentabilidade 2014*, 2014b. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/Relatorio%20de%20Sustentabilidade_2014_web.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2014.
- _____. *A indústria do aço no Brasil*, 2014c. Disponível em: http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/livro_cni.pdf. Acesso em: 11 ago. 2014.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO – MCTI/SECRETARIA DE POLÍTICAS E PROGRAMAS DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO – SEPED/COORDENAÇÃO GERAL DE MUDANÇAS GLOBAIS DE CLIMA – CGMC. *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. MCTI, 2013 Disponível em: <<http://gyces.com.br/arquivos/177/EstimativasClima.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2014.

WSA – WORLD STEEL ASSOCIATION. *Sustainable steel policy and indicators 2013*. Disponível em: <<http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/Sustainable-Steel-Policy---Indicators-2013/document/Sustainable%20steel%3A%20Policy%20and%20indicators%202013.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2014.

_____. *Steel's contribution to a low carbon future, 2014*. Disponível em: <http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/Steel-s-contribution-to-a-Low-Carbon-Future-2014/document/Steel_s%20contribution%20to%20a%20Low%20Carbon%20Future%202014.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2014.

Sites consultados

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO (BIG) – <www.aneel.gov.br>.

CARBON TRUST, EU EMISSIONS TRADING SCHEME (EU ETS) – <www.carbontrust.com>.

IETD – INDUSTRIAL EFFICIENCY TECHNOLOGY DATABASE – <<http://ietd.iipnetwork.org>>.

ULCOS – ULTRA-LOW CARBON DIOXIDE (CO₂) STEELMAKING – <www.ulcos.org>.

Bibliografia

D'ABREU, J. C. *Estudo setorial da siderurgia*. Rio de Janeiro: Lucky Editora, 2009.

MOURÃO, M. B. *Introdução à siderurgia*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

