

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

VINICIUS FERREIRA BOICO

**A redução das emissões de Gases do Efeito Estufa nas
indústrias de ferro-gusa e aço e química por meio da
alteração da matriz energética**

São Carlos
2013

VINICIUS FERREIRA BOICO

**A redução das emissões de Gases do Efeito Estufa nas
indústrias de ferro-gusa e aço e química por meio da
alteração da matriz energética**

Monografia apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos necessários para a obtenção do
título de Engenheiro Ambiental

Orientadora: Daisy Aparecida do Nascimento
Rebelatto

São Carlos
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

F678a Ferreira Boico, Vinicius
A redução das emissões de Gases do Efeito Estufa
nas indústrias de ferro-gusa e aço e química por meio
da alteração da matriz energética. / Vinicius Ferreira
Boico; orientadora Daisy Aparecida do Nascimento
Rebelatto. São Carlos, 2013.

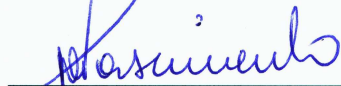
Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2013.

1. Energias renováveis. 2. Gases do Efeito Estufa
(GEE). 3. Indústria de ferro-gusa e aço. 4. Indústria
química. I. Título.

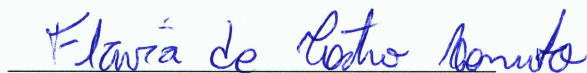
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato(a): **Vinicius Ferreira Boico**

Monografia defendida e aprovada em: **30/09/2013** pela Comissão Julgadora:



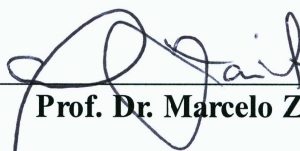
Profa. Dra. Daisy Aparecida Nascimento Rebelatto



Flávia de Castro Camioto



Naja Brandão Santana



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, Fátima, Osmar, Vitor e Luma, que me acompanharam me dando suporte, amor, carinho ou simplesmente por estarem comigo cada dia de meus estudos durante a graduação.

À minha orientadora Daisy Rebelatto, que sem ela essa pesquisa não seria possível.

À Flávia Camioto, que sempre me motivou, me auxiliou em minhas dúvidas e dedicou parte de seu tempo para melhoria de meu trabalho, além de continuar me orientando em assuntos acadêmicos.

À Silvana da secretaria da Engenharia Ambiental por sempre estar disposta em ajudar com muita simpatia.

À turma de Engenharia Ambiental 08, que me proporcionou grandes amizades e uma rotina agradável durante minha estadia em São Carlos. À turma 09 também.

Às repúblicas Bonobos e 33, onde eu vivi e me descontraí.

Aos amigos Glamour, Estella, Fanta, Palmito, Berna (oooba), Tutis, Fram, Jú, Pólipo, Tobias, Chaleira, Bia linda, Réci, Quel e Ali (seguro) pelos sorrisos e amizade, ou simplesmente por fazer um bom chazinho.

À Júlia Beltrami, estudante de Eng. Metalúrgica da UFRGS, pelo material fornecido.

Ao bandeirão da USP, que além de ser bom é barato e me economizou muito tempo para continuar estudando.

Em especial, agradeço ao meu amigo Kenzo, pela disposição em me auxiliar em todas as etapas da minha pesquisa, desde a elaboração da proposta e envio à FAPESP até a formatação e impressão final desse documento.

RESUMO

BOICO, V. F. **A redução das emissões de Gases do Efeito Estufa nas indústrias de ferro-gusa e aço e química por meio da alteração da matriz energética.** 2013. Trabalho de Graduação - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

O elevado crescimento industrial e demográfico observados nas últimas décadas ocorreu de forma desordenada, causando impactos negativos ao meio ambiente. Como a matriz energética do setor industrial é constituída essencialmente por combustíveis fósseis, o mesmo contribui de maneira significativa para a elevação do efeito estufa. Portanto, é indispensável que se amplie a participação de fontes de energia renováveis na indústria brasileira, a fim de reduzir as emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE). Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar e quantificar as emissões de CO₂ e discutir a alteração de energéticos na indústria brasileira de ferro-gusa e aço e na indústria química, com foco no ano de 2010. Para tanto, foi utilizada a metodologia *top-down* proposta pelo IPCC para quantificar as emissões de gás carbônico por combustível; realizou-se uma análise de investimento para a troca de coque de carvão mineral por carvão vegetal na indústria de ferro-gusa e aço, por serem consumidos em larga escala nos altos-fornos; além de pesquisas bibliográficas e exploratórias. Constatou-se a emissão de 59,9 Mt de CO₂ para a indústria de ferro-gusa e aço, em que 44% corresponde ao uso coque de carvão mineral e 25%, ao uso do carvão vegetal. O carvão vegetal foi considerado mais apto do que o coque de carvão mineral para ser utilizado em altos-fornos, pois é um combustível renovável (recupera o CO₂ emitido quando obtido de áreas de reflorestamento), possui menor teor de impurezas e reduz a insegurança de suprimento. Entretanto, observou-se que os custos seriam muito elevados para a troca desses energéticos. Com relação à indústria química, foram emitidas 12,5 Mt de CO₂, dos quais outras fontes secundárias do petróleo e o gás natural emitiram 54 e 40% do total, respectivamente. O óleo combustível foi considerado o mais poluente e o gás natural, o mais viável ambientalmente, para esta indústria. Por fim, os resultados das emissões de CO₂ podem compor um inventário de emissões de GEE, funcionando como ferramenta na análise estratégica da viabilidade econômica, técnica e ambiental da utilização de combustíveis no setor industrial.

Palavras-chave: Energias renováveis. Gases do Efeito Estufa (GEE). Indústria de ferro-gusa e aço. Indústria química.

ABSTRACT

BOICO, V. F. The decrease of Greenhouse Gases emissions in the industries of pig iron and steel and chemical by changing the energy mix. 2013. Undergraduate Project - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

The high industrial and demographic growth observed in recent decades were desorganized and they caused negative impacts to the environment. As the industrial energy sector consists mainly of fossil fuels, it contributes significantly to the increase of the greenhouse effect. Therefore, it is essential to increase the participation of renewable energy sources in the brazilian industry in order to reduce the emissions of Greenhouse Gases (GHGs). Based on this context, the present study aimed to analyze and quantify CO₂ emissions and discuss the change of energy in the brazilian pig iron and steel and chemical industries, focusing on the year 2010. For this, the top-down methodology, proposed by the IPCC was used to quantify carbon emissions by fuel ; an investment analysis was performed for the exchange of mineral coal coke for charcoal in pig iron and steel industry and bibliographical researchs were achieved. It found the emission of 59.9 Mt CO₂ for the pig iron and steel industry, in which 44% corresponds to the use of coking coal and 25% corresponds to the use of charcoal. The charcoal was considered more able than mineral coal coke for use in blast furnaces, because it is a renewable fuel (retrieves the CO₂ emitted when obtained in reforestation areas), has a lower content of impurities and reduces insecurity supply. However, it was observed that the costs would be very high to exchange such fuels. About the chemical industry, were emitted 12.5 Mt of CO₂, which other secondary sources of oil and natural gas issued 54 and 40% of the total, respectively. The fuel oil was considered the most polluting and natural gas, the most environmentally feasible for this industry. Finally, the results of CO₂ emissions can compose an inventory of GHG emissions, working as a tool for strategic analysis of economic feasibility, technical and environmental fuel use in the industrial sector.

Keywords: Renewable energy. Greenhouse Gases (GHG). Pig iron and steel industry. Chemical Industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de carvão, reservas e usos (ANEEL, 2009)	13
Figura 2 – Fluxo simplificado de produção do aço (IAB, 2013b).....	22
Figura 3– Fluxo de materiais dentro do alto-forno.....	27
Figura 4– Conversor a oxigênio para remoção de impurezas e produção do aço (THOMAZ, 2010)	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de combustível do setor industrial de ferro-gusa e aço	31
Tabela 2 – GEE da produção de ferro-gusa e aço	33
Tabela 3 – Ranking da indústria química mundial	35
Tabela 4 – Consumo de combustível do setor industrial de produtos químicos	37
Tabela 5 – Consumo de energia no setor químico em 2010.....	38
Tabela 6– Fatores de emissão de carbono segundo o BEESP	42
Tabela 7 – Fatores de emissão de carbono segundo o IPCC	42
Tabela 8 – Etapas I, II e III da metodologia de quantificação das emissões de CO ₂ para a indústria de ferro-gusa e aço	48
Tabela 9 – Etapas IV, V e VI da metodologia de quantificação das emissões de CO ₂ para a indústria de ferro-gusa e aço	48
Tabela 10 – Emissões de CO ₂ considerando consumo total do setor por apenas um combustível.....	50
Tabela 11 – Custo anual dos combustíveis fixando a quantidade consumida.....	55
Tabela 12 – Fluxo de caixa para o investimento em carvão vegetal	56
Tabela 13 – Fluxo de caixa para o investimento com horizonte de tempo de 15 anos ..	56
Tabela 14 – Etapas I, II e III da metodologia de quantificação das emissões de CO ₂ para a indústria química.....	57
Tabela 15 – Etapas IV, V e VI da metodologia de quantificação das emissões de CO ₂ para a indústria química.....	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS	2
2.1.1 <i>A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas e o Protocolo de Quioto</i>	<i>3</i>
2.1.2 <i>Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas.....</i>	<i>5</i>
2.1.3 <i>O ciclo do carbono</i>	<i>6</i>
2.1.4 <i>O efeito estufa e o aquecimento global</i>	<i>8</i>
2.2 FONTES DE ENERGIA	10
2.2.1 <i>Carvão Vegetal.....</i>	<i>11</i>
2.2.2 <i>Carvão Mineral</i>	<i>12</i>
2.2.3 <i>Coque de Carvão Mineral</i>	<i>15</i>
2.2.4 <i>Óleo Combustível</i>	<i>16</i>
2.2.5 <i>Gás natural.....</i>	<i>17</i>
2.2.6 <i>Alcatrão e outras fontes secundárias do petróleo.....</i>	<i>18</i>
2.2.7 <i>Bagaço de cana-de-açúcar.....</i>	<i>18</i>
2.2.8 <i>Comparação entre o coque de carvão mineral e o carvão vegetal.....</i>	<i>20</i>
2.2 CARACTERIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA E AÇO.....	22
2.2.1 <i>A evolução da produção de ferro-gusa e aço e dos combustíveis utilizados</i>	<i>23</i>
2.2.2 <i>O processo de redução de minério de ferro a ferro-gusa</i>	<i>25</i>
2.2.3 <i>A produção de aço.....</i>	<i>27</i>
2.2.4 <i>A indústria brasileira de ferro-gusa e aço</i>	<i>29</i>
2.2.5 <i>Combustíveis utilizados pelo setor de ferro-gusa e aço</i>	<i>31</i>
2.2.6 <i>Emissões de GEE no processo produtivo.....</i>	<i>33</i>
2.3 CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA QUÍMICA.....	34
2.3.1 <i>Descrição do perfil da indústria química brasileira</i>	<i>35</i>
2.3.2 <i>Combustíveis utilizados pelo setor de produtos químicos.....</i>	<i>36</i>

3 MÉTODO	39
3.1 O CONSUMO APARENTE DE COMBUSTÍVEL.....	40
3.2 CONVERSÃO PARA UMA UNIDADE COMUM DE ENERGIA	41
3.3 FATORES DE EMISSÃO DE CARBONO.....	41
3.4 O CARBONO ESTOCADO	43
3.5 A COMBUSTÃO INCOMPLETA	43
3.6 CONVERSÃO DA QUANTIDADE DE CARBONO OXIDADA EM EMISSIONES DE CO ₂	44
3.7 REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	44
3.8 VALOR PRESENTE.....	45
4 RESULTADOS	47
4.1 INDÚSTRIA DE FERRO-GUSA E AÇO	47
4.1.1 <i>As emissões de CO₂ da indústria de ferro-gusa e aço.....</i>	<i>47</i>
4.1.2 <i>Uso de um combustível para suprir toda a demanda energética</i>	<i>50</i>
4.1.3 <i>Substituição de dois dos três combustíveis mais utilizados.....</i>	<i>52</i>
4.1.4 <i>Análise da viabilidade econômica da substituição do coque de carvão mineral por carvão vegetal</i>	<i>54</i>
4.2 INDÚSTRIA QUÍMICA	57
4.2.1 <i>As emissões de CO₂ da indústria química.....</i>	<i>57</i>
4.2.2 <i>Uso de um combustível para suprir toda a demanda energética</i>	<i>60</i>
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1 INTRODUÇÃO

Devido o crescimento do setor industrial nas últimas décadas, fez-se uso intensivo dos recursos naturais sem a devida precaução quanto sua escassez futura e aos impactos ambientais decorrentes da sua utilização desenfreada. Combustíveis estão sendo usados em larga escala para manter a produção mundial, resultando em uma diminuição potencial dos estoques naturais e em alterações da qualidade atmosférica global, devido às emissões de gases poluentes.

Assim sendo, faz-se necessário a alteração da matriz energética industrial, de forma a garantir o abastecimento por longo período de tempo e minimizar os impactos ambientais causados pelo uso de combustíveis fósseis. Por ser o maior consumidor desses combustíveis, o setor industrial de ferro-gusa e aço é o foco de estudo dessa pesquisa, que tem por objetivo analisar o efeito da substituição dos energéticos utilizados no setor, para a redução das emissões atmosféricas de Gases do Efeito Estufa (GEE). A mesma análise foi realizada para o setor industrial de produtos químicos, abrangendo o foco da pesquisa e fornecendo maiores resultados para efeito de comparação.

Dentre os GEE, o gás carbônico foi selecionado para o estudo, pois é o principal causador do aumento do efeito estufa, devido às grandes quantidades emitidas, que afetam o balanço de carbono na Terra (GOLDEMBERG; LUCON, 2008). Para a mensuração das emissões de CO₂, por combustível, é utilizada a metodologia *top-down* adotada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)¹. Destaca-se que a quantificação mais adequada para os combustíveis provenientes da biomassa deve ser feita considerando as mudanças no uso do solo e florestas. O que a metodologia *top-down* propõe é uma quantificação destes energéticos sem considerar a propriedade de captura de CO₂ destes combustíveis durante seu ciclo de vida característico. Portanto, os resultados serão interpretados com cautela para que não haja conclusões precipitadas.

Para o desenvolvimento do atual trabalho, é necessário que se discorra sobre alguns assuntos primordiais ao entendimento do tema abordado. Entre eles, far-se-á um estudo bibliográfico exploratório dos seguintes tópicos: as variações climáticas e o gás carbônico, o setor industrial de ferro-gusa e aço, a indústria química e o consumo de combustíveis fósseis e renováveis dos setores.

¹ em inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change*

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Recentemente, tem-se presenciado mudanças consideráveis no meio ambiente, causadas pela ação do homem. Estas mudanças, denominadas antrópicas ou antropogênicas, eram insignificantes antes da Revolução Industrial ocorrida no final do século XIX, mas se tornaram preocupantes devido ao aumento populacional e ao uso predatório dos recursos naturais, notadamente os energéticos, principalmente nos países industrializados (GOLDEMBERG; LUCON, 2008).

É possível que as consequências das rápidas e consideráveis interferências humanas ao clima global sejam observáveis somente em longo prazo. O impacto social da restrição das emissões atmosféricas e a eficiência de cada ação podem, também, ser altamente discutíveis, devido à necessidade de recursos financeiros imediatos e os benefícios serem de longa data (MARTENS; ROTMANS, 1999). Entretanto, faz-se necessário que os tomadores de decisão definam os objetivos de uma política de mudanças climáticas, alocando recursos e esforços para os diversos elementos deste problema. Segundo Martens e Rotmans (1999), a grande dificuldade disso ocorre devido ao elevado interesse em avaliar o custo-benefício das estratégias de redução das emissões, em detrimento de outros fatores relacionados à problemática.

De acordo com Martens e Rotmans (1999), casos históricos de desastres ambientais, como o declínio do mar de Aral, nos ensinam que as interações entre os processos sociais, econômicos, culturais, físicos e políticos relacionados com o aumento da emissão antropogênica de gases do efeito estufa (GEE) só podem ser subestimados. Por isso, segundo os mesmos autores, há necessidade imediata de decisões políticas em como se prevenir e se adaptar às mudanças climáticas e em como alocar fundos para pesquisas na área. Dessa forma, é prioritário que se vá além das diversas pesquisas isoladas sobre o clima.

Devido às evidências de que a forma de desenvolvimento poderia causar danos à biosfera e, conseqüentemente, afetar drasticamente a humanidade, foi realizada, em 1992, a 2ª Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, onde firmou-se a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (CQNUMC), que foi responsável pelo acordo chamado Protocolo de Quioto, ambos descritos a seguir.

2.1.1A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas e o Protocolo de Quioto

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas é um acordo ambiental pioneiro que envolve a comunidade internacional.

Entrou em vigor em 1994 e, até abril de 2006, havia sido assinada por 189 “partes” (países), que assumem um compromisso internacional para a proteção legal do equilíbrio ambiental, sob os termos da Convenção (UNFCCC, 2006).

O objetivo da Convenção é estabelecer diretrizes e condições para estabilizar a concentração dos GEE na atmosfera, em níveis tais que evitem a interferência antrópica perigosa no sistema climático (ROCHA; MELLO, 2004).

Segundo Gaudard (2006), para dividir as responsabilidades pelas ações mitigadoras do aquecimento global, os países foram divididos em dois grupos, de acordo com os princípios de equidade e de “responsabilidade comum, mas diferenciada”:

- Países pertencentes ao Anexo 1: Países industrializados membros da Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico² (OCDE), exceto México e Coréia do Sul, com grandes níveis de emissões de GEE, possuem condições financeiras e tecnológicas para atingir as reduções. O mesmo vale para os países industrializados em processo de transição para uma economia de mercado como a Rússia e os países da Europa Central e Oriental.
- Países pertencentes ao Anexo B: Países em desenvolvimento que devem relatar as suas ações em relação às mudanças climáticas.

Ficou estabelecido que os países signatários se encontrariam regularmente para continuar as discussões na Conferência das Partes (COP).

O primeiro acordo realizado no âmbito da CQNUMC a estabelecer compromissos de redução das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE), além de definir critérios e diretrizes para a utilização de mecanismos de mercado, foi o Protocolo de Quioto (OLIVEIRA, 2007).

Desta forma, foram quantificadas metas de redução de emissões de GEE para os países do Anexo 1, para um período de compromisso entre 2008 e 2012. A contabilização das

²em inglês, *Organisation for Economic Co-operation and Development*

reduções de emissões é expressa em dióxido de carbono equivalente (CO₂e), uma vez que este gás se destaca como o principal gás de efeito estufa (CUNHA, 2005).

A transferência ou aquisição de unidades de reduções de emissões são reguladas por mecanismos de flexibilização estabelecidos no Protocolo de Quioto. São eles:

- *Implementação Conjunta*

Essa atividade possibilita a negociação bilateral de projetos de redução de emissões de GEE entre países integrantes do Anexo B do Protocolo. A Implementação Conjunta permite que países do Anexo 1 possam compensar suas emissões participando de sumidouros e projetos de redução de emissões entre si e assim, constituir e transferir unidades de redução de emissões de GEE do país em que o projeto está sendo implementado para o país emissor (CUNHA, 2005).

- *Comércio de Emissões (CE)*

Permite que as Partes incluídas no Anexo B comercializem permissões de emissões. Essas permissões serão alocadas em cada Parte conforme os respectivos compromissos quantificados de redução de emissões de GEE, permitindo-se às Partes livremente transferir ou adquirir permissões, mas sempre se mantendo o número máximo de permissões em circulação ao mercado igual ao total do volume permitido de emissões de carbono (IPCC, 2001).

- *Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)*

O MDL objetiva assistir as Partes não incluídas no Anexo 1 (países em desenvolvimento) para que atinjam o desenvolvimento sustentável e contribuam para os objetivos da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, bem como assistir as Partes incluídas no Anexo 1 para que cumpram suas metas quantificadas de redução das emissões (OLIVEIRA, 2007).

A ideia central do MDL é que os países desenvolvidos possam investir em projetos de redução de emissões a custos menores nos países em desenvolvimento, recebendo créditos de redução e diminuindo a necessidade de implementar medidas internas de mitigação, possivelmente a maiores custos marginais. Em contrapartida, os países em desenvolvimento beneficiam-se com o incremento do fluxo de investimentos, agora

direcionado a alcançar metas de desenvolvimento sustentável (URC, 2003). Neste sentido, o MDL pode (CUNHA, 2005; URC, 2003):

- atrair capital para projetos que apoiem transição a uma economia mais próspera e menos intensiva em carbono;
- incentivar e permitir a participação ativa tanto do setor público como do setor privado;
- agir como ferramenta de transferência de tecnologias ambientalmente sustentáveis;
- ajudar a definir prioridades de desenvolvimento sustentável, mediante transferência de tecnologias e recursos financeiros;
- incentivar as alternativas sustentáveis de geração de energia elétrica;
- incentivar o incremento de medidas de conservação e eficiência energética;
- buscar a diminuição da pobreza mediante a geração de emprego e renda;
- fomentar os benefícios ambientais locais.

A composição dos projetos do MDL brasileiros envolve forte componente de redução de gás carbônico (CO₂), representando 65% do número de projetos brasileiros, seguido pelo metano (CH₄), com 34%, e óxido nitroso (N₂O), correspondendo a apenas 1% dos projetos.

Para fornecer informações ao entendimento das mudanças climáticas, seus impactos potenciais e opções de mitigação, foi estabelecido o Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

2.1.2 Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) é um órgão composto por delegações de 130 governos para prover avaliações regulares sobre a mudança climática. Nasceu em 1988, da percepção de que a ação humana poderia estar exercendo uma forte influência sobre o clima do planeta e que é necessário acompanhar esse processo (CASTRO, 2007).

Segundo o IPCC (2011), o órgão foi estabelecido pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente³ (PNUMA) e pela Organização Mundial de Meteorologia⁴ (OMM)

³ O PNUMA, principal autoridade global em meio ambiente, é a agência da Organização das Nações Unidas (ONU) responsável por promover a conservação do meio ambiente e o uso eficiente de recursos no contexto do desenvolvimento sustentável (FIQUEIRA, 2011).

para fornecer ao mundo uma visão científica clara sobre o estado atual do conhecimento em mudanças climáticas e seus potenciais impactos ambientais e socioeconômicos.

Impacto ambiental é definido pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 01/86, de 23/01/86 (artigo 1º), como sendo:

[...] qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente [...] resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetam: a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições sanitárias e estéticas do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais.

Por meio do Painel Intergovernamental em Mudança do Clima, a Organização das Nações Unidas (ONU) passou a desenvolver e a implementar os critérios técnicos e científicos que viabilizaram o início dos debates sobre as mudanças climáticas. Em 1990, as Nações Unidas, de acordo com as recomendações do IPCC, iniciaram as negociações para a adoção do que viria a ser a primeira Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima (CQNUMC).

No final do ano de 2012 foi realizada a 18ª Conferência das Partes das Nações Unidas sobre Mudança Climática (COP-16), com a participação de mais de 190 países (ECODESENVOLVIMENTO, 2011). De acordo com o Estadão (2012), os países participantes adotaram um princípio de acordo com o qual adiam o período de vigência do Protocolo de Quioto para 2020.

Por enquanto, a União Europeia é a única região do mundo com legislação vinculativa de redução de emissões, contemplando, inclusive, obrigações em longo prazo, posteriores a 2020 (ITAMARATY, 2011).

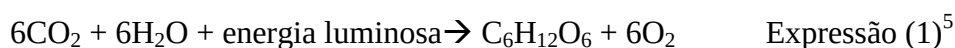
Para um melhor entendimento da dinâmica das emissões de CO₂ no sistema terrestre e posterior análise de sua participação para o aquecimento global, faz-se necessário um estudo prévio do ciclo do carbono, descrito a seguir.

2.1.3 O ciclo do carbono

⁴A Organização Mundial de Meteorologia é a autoridade das Nações Unidas sobre o estado da atmosfera, clima e oceanos da Terra. A OMM facilita o comando, habilidade e cooperação nos recursos de tempo, clima, hidrologia e água e nas questões ambientais relacionadas (FIQUEIRA, 2011).

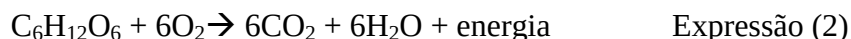
Segundo Braga et al. (2002), a atmosfera é o reservatório de carbono, onde o nutriente das plantas encontra-se na forma de dióxido de carbono (CO₂), um gás que, nas condições naturais de temperatura e pressão, é inodoro e incolor. Braga et al. (2002), afirmam que o carbono é o principal constituinte da matéria orgânica, e participa em até 49% do peso orgânico seco. Vale ressaltar que o CO₂, liberado por todas as plantas e animais em seu processo vital de respiração, recicla-se a uma taxa de, aproximadamente, uma vez a cada 300 anos (MILLER, 1985).

O gás carbônico é utilizado pelas plantas juntamente com o vapor de água para, na presença de luz, sintetizar compostos orgânicos de carbono, hidrogênio e oxigênio. A reação de fotossíntese pode ser expressa, de acordo com Braga et al. (2002), por:



É importante observar que, nesse processo, o dióxido de carbono é retirado da atmosfera e o carbono da molécula de CO₂ é fixado em sua forma orgânica.

A energia que fica armazenada nas moléculas orgânicas (como a glicose) é liberada no processo de respiração, em que há liberação de energia, como indicado, por Braga et al. (2002), na seguinte reação química:



Por meio das expressões (1) e (2) nota-se que o carbono passa de sua forma inorgânica a sua forma orgânica e vice-versa, completando assim o seu ciclo biogeoquímico.

Têm-se ainda os reservatórios terrestres e aquáticos de gás carbônico, nos quais pequenas perturbações podem causar grandes efeitos na concentração atmosférica. Tais reservatórios armazenam mais carbono do que o ambiente atmosférico (WADA, 2006).

A interação de CO₂ entre os reservatórios aquático e atmosférico ocorre por meio de uma reação química de difusão⁶, cujo aumento da concentração de CO₂ na atmosfera resulta na absorção desse excesso pelo oceano (BRAGA et al., 2002). Entretanto, a partir da revolução industrial, o homem passou a fazer uso intenso dessa energia armazenada e no

⁵Em que o H₂O representa a água, o C₆H₁₂O₆, a molécula de glicose e o O₂, a molécula de oxigênio

⁶Processo em que a atmosfera e a água trocam continuamente moléculas de CO₂. A difusão do dióxido de carbono nos oceanos é responsável por quase metade do carbono extraído da atmosfera. Os oceanos mais frios absorvem mais CO₂ do que as águas mais quentes, uma vez que tal gás é mais solúvel em altas pressões e baixas temperaturas (IPAM, 2013).

processo de combustão (queima) passou a devolver o CO_2 à atmosfera a uma taxa superior à capacidade de assimilação pelas plantas e pelo oceano. Braga et al. (2002) confirmam que tal desequilíbrio do ciclo natural pode ter implicações na alteração do chamado “efeito estufa”, com consequente aumento da temperatura global da Terra. Diante da variedade de fatores envolvidos no mecanismo de recuperação do sistema, é difícil responder se os oceanos serão capazes de absorver o excesso de dióxido de carbono gerado.

Como consequência da elevada concentração de CO_2 na atmosfera, observam-se alterações climáticas a nível global, que serão melhores detalhadas no próximo item.

2.1.4 O efeito estufa e o aquecimento global

A atmosfera terrestre atual é composta, em média, de 78% de nitrogênio (N_2); 21% de oxigênio (O_2); 0,9% de argônio; 0,03% de dióxido de carbono (CO_2) e vapor d’água. Dentre esses componentes, o CO_2 , o vapor d’água e outros gases de menor concentração na atmosfera, como o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), contribuem de maneira significativa para o fenômeno natural de efeito estufa que tem mantido a temperatura média global em torno de 15° Celsius (SUGUIO, 2008); sendo chamados de gases do efeito estufa (GEE).

O efeito estufa ocorre devido à elevação de energia que é mantida na atmosfera. Esta elevação de energia se deve à absorção, pelos GEE, de raios infravermelhos refletidos pela superfície terrestre. Segundo Martens e Rotmans (1999), a maior parte da radiação solar que entra na atmosfera (emitida na forma de raios ultravioletas) não é absorvida por ela, provocando o aquecimento da superfície terrestre. A superfície também emite radiação (na forma de raios infravermelhos), mas, ao contrário dos raios emitidos pelo Sol, essa radiação tem sua maior parte absorvida pela atmosfera. Isso ocorre, pois os gases do efeito estufa, quando atingidos por raios infravermelhos, são trazidos a um estado mais elevado de energia e, posteriormente, emitem essa energia na forma de radiação para a atmosfera. Dessa forma, a energia é mantida na atmosfera terrestre, ocasionando o efeito estufa. Com isso, pode-se concluir que quanto maior a concentração dos GEE na atmosfera, maior será a quantidade de radiação infravermelha mantida na Terra.

Observa-se, entretanto, que devido ao crescimento demográfico, tecnológico e industrial (impulsionado pela Revolução Industrial), a concentração de GEE na atmosfera vem aumentando em proporções nunca antes constatadas. Segundo Cardoso (2006), o CO_2 ,

como principal responsável pelo aumento do efeito estufa por atividades antrópicas, teve sua concentração elevada em 27% nos últimos cem anos, essencialmente pela queima de combustíveis fósseis – carvão, petróleo e gás natural – na produção de energia. Em Mauna Loa, Havaí, foi realizada uma série de experiências que permitiram medir a concentração de gás carbônico na atmosfera terrestre e verificou-se um gradual aumento nas concentrações de CO₂ (CESAR, 2010). O Gráfico 1 apresenta essa elevação da concentração.

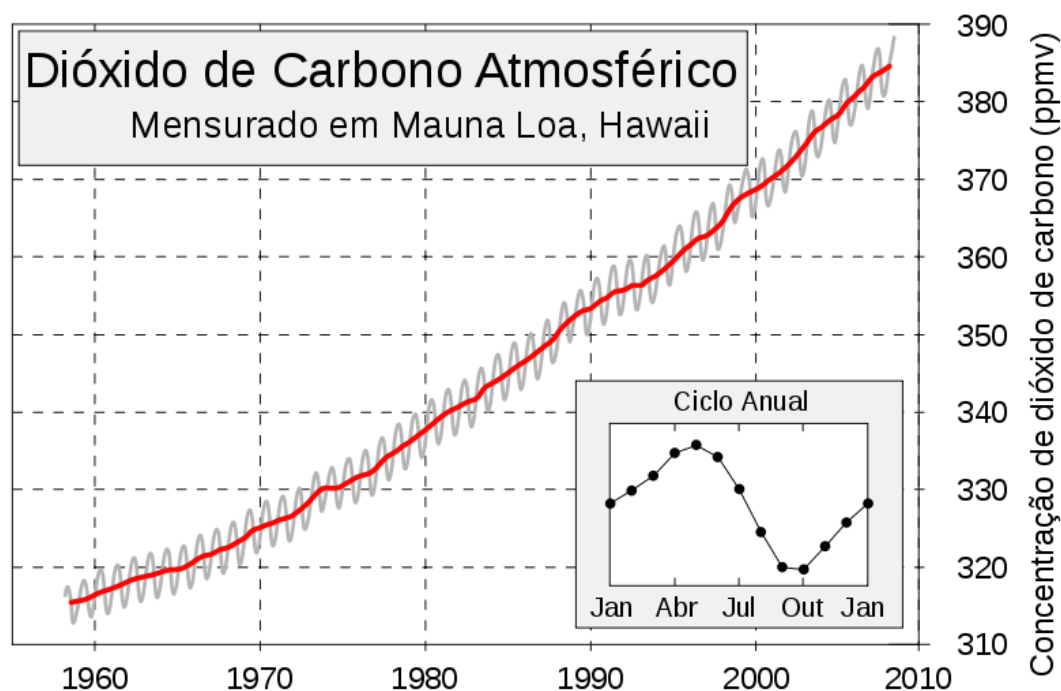


Gráfico 1 – Curva obtida em Mauna Loa (Havaí), que mostra o crescimento da concentração CO₂ na atmosfera (CESAR, 2010)

Devido ao aumento da concentração de CO₂ e de outros GEE na atmosfera terrestre, observam-se alterações climáticas em nível global, com consequências no ambiente natural e humano (IPCC, 2007). Tais alterações resultam na elevação da temperatura terrestre, fenômeno chamado de aquecimento global.

O Quarto Relatório de Avaliação em Mudanças Climáticas do IPCC, emitido em 2007, afirma que, a evidência observacional de todos os continentes e da maioria dos oceanos mostram que muitos sistemas naturais estão sendo afetados pelas mudanças climáticas regionais, particularmente o aumento da temperatura.

De acordo com o IPCC (2007), o aquecimento global ocasiona mudanças na neve, gelo e solo congelado, efeitos no sistema hidrológico e alterações no sistema biológico terrestre e aquático. As consequências dessas variações incluem:

- aumento do número de lagos glaciais;
- aumento da instabilidade do solo em regiões polares e montanhosas;
- mudanças em ecossistemas do Ártico e da Antártida;
- aumento do escoamento e vazão de pico em geleiras e rios alimentados por neve;
- aquecimento de lagos e rios em diversas regiões;
- antecipação dos eventos de primavera;
- deslocamento de espécies de regiões glaciais em direção aos polos.

Outras variações climáticas que, segundo o IPCC (2007), ainda não possuem literatura solidificada, mas que podem ser observadas são:

- crescentes danos de inundações costeiras, perda de áreas úmidas costeiras e manguezais, causadas pelo aumento do nível dos oceanos aliado às atividades humanas;
- redução da duração das estações de cultivo em regiões africanas;
- riscos de inundações de assentamentos em regiões montanhosas.

2.2 FONTES DE ENERGIA

Combustíveis para utilização em energia e aquecimento industrial devem apresentar características importantes, tais como baixo custo por conteúdo energético, disponibilidade, facilidade de transporte e armazenamento, possibilidade de utilização dentro de tecnologias disponíveis, baixo custo operacional e de investimento, etc (BIZZU, 2005). O mesmo autor afirma que, durante muitos anos, os derivados de petróleo preencheram a maioria destas características e se tornaram o tipo mais utilizado de combustível industrial. Nas últimas décadas, outros tipos de combustíveis têm sido utilizados e pesquisados, principalmente aqueles que produzem menor impacto ambiental que os combustíveis fósseis.

Os combustíveis podem ser classificados como renováveis ou não renováveis. Uma fonte de energia é considerada renovável quando as condições naturais permitem sua reposição em um curto horizonte de tempo (GOLDEMBERG; LUCON, 2008). Fontes não renováveis de energia são aquelas que a natureza não tem condições de repor em um horizonte de tempo compatível com seu consumo pelos seres humanos (GOLDEMBERG; LUCON, 2008). No geral, têm tecnologia difundida, mas possuem um elevado impacto ambiental.

Serão apresentados, a seguir, os principais combustíveis utilizados no setor industrial, com foco naqueles mais empregados na indústria de ferro-gusa e aço e na indústria química. Entre eles, serão descritos combustíveis renováveis (carvão vegetal e outros combustíveis alternativos) e não renováveis (carvão mineral, coque de carvão mineral e os derivados do petróleo).

2.2.1 Carvão Vegetal

De acordo com Pagliuso (1984), o carvão vegetal é obtido artificialmente em fornos especiais, sendo que 1 m³ de carvão é obtido a partir de 2m³ de lenha. Seu poder calorífico⁷ está em torno de 7000 kcal/kg e possui em sua composição carbono fixo matéria volátil e cinzas. É proveniente da biomassa, sendo a biomassa todo material constituído principalmente de substâncias de origem orgânica, ou seja, de animais e vegetais (CEPA, 2001).

O carvão vegetal é derivado de uma matéria-prima renovável, que tem poder de captura de CO₂ da atmosfera por meio da reação da fotossíntese. O processo ocorre durante o período de crescimento da floresta, pelo qual as árvores capturam carbono da atmosfera, liberando oxigênio (CETEC, 1982).

Segundo o CETEC (1982), apesar dos benefícios apresentados com a utilização do carvão vegetal é preciso analisar as consequências que a sua produção provoca. Uma delas é o fator social, quando pessoas adultas e até crianças trabalham nas carvoarias (unidades produtoras de carvão a partir da lenha), na maioria das vezes em condições precárias de trabalho e baixíssimos salários. Outro fator de grande importância é o ambiental, pois para o desenvolvimento dessa atividade, diversas vezes é preciso retirar a cobertura vegetal de importantes composições vegetativas contidas no território brasileiro, que geralmente não são oriundos de madeiras de reflorestamento ou madeira cultivada para esse fim.

Ferreira (2000) afirma que, em Minas Gerais, a madeira geralmente utilizada para a produção do carvão provém de várias espécies de eucalipto⁸, selecionadas como bem adaptáveis ao clima e solo da região. Modernas práticas de silvicultura foram observadas com os objetivos de preservar parte do cerrado nativo e a fauna, produzindo carvão de boa qualidade e a custos convenientes.

⁷ Poder calorífico é a quantidade de calor produzida pela combustão completa de uma unidade de massa do combustível (BARROS, 2004).

⁸ Por exemplo: *E. Camaldulensis*, *Cloesia*, *Urophylla* e *Pellita*

Segundo Ferreira (2000), as empresas do Estado de Minas Gerais responsáveis pelo plantio e pelo manejo de florestas de eucalipto, caso da Mannesmann Florestal SA, realizam técnicas de manejo florestal, como ilhas de mata nativa ligadas por corredores ecológicos, que facilitam o trânsito de animais de grande porte e preservam pássaros e insetos que atuam como controladores biológicos de pragas. O mesmo autor diz que, com o emprego de clones de mudas já disponíveis comercialmente, espera-se o aumento da produção de madeira por hectare.

Na opinião de Rocha (2011), para produzir ferro-gusa e aço ambientalmente viáveis, deverão ser realizadas parcerias do tipo público-privadas e aumentar a eficiência na produção de lenha e carvão vegetal com controle da matéria-prima e o seu aproveitamento integral. Rocha (2011) reitera a importância em diminuir o consumo de matéria-prima proveniente da floresta nativa na produção de lenha e carvão vegetal com leis que sejam efetivas e inibam crimes ambientais.

O produto final da fabricação de aço utilizando carvão vegetal obtido de lenha de florestas plantadas é considerado, por Rocha (2011), como aço verde, o que atribui características únicas ao aço brasileiro, capaz de ajudar na mitigação das emissões de gases do efeito estufa de forma vantajosa.

Pode-se também viabilizar o uso de matérias-primas não florestais para produção de carvão vegetal. Nesse campo, os resíduos agroindustriais e processos de carbonização e pirólise para produzir carvão usando essas matérias-primas serão inovadores. Podem-se citar os briquetes siderúrgicos (blocos densos e compactos) e carvão vegetal em pó derivados de resíduos agroindustriais e florestais como desenvolvimentos importantes a realizar (ROCHA, 2011).

2.2.2 Carvão Mineral

De acordo com Pinheiro (2004), o carvão mineral é uma massa compacta, estratificada, oriunda da deterioração de matérias vegetais os quais passam por vários estágios de decomposição consequente de ações geológicas que provocam modificações em suas propriedades físicas e químicas. Devido ao maior ou menor tempo a que ficou exposta à decomposição, a matéria vegetal dá origem a carvões com diferentes propriedades, os quais possuem diferentes teores de carbono e de umidade, como indicado na Figura 1.

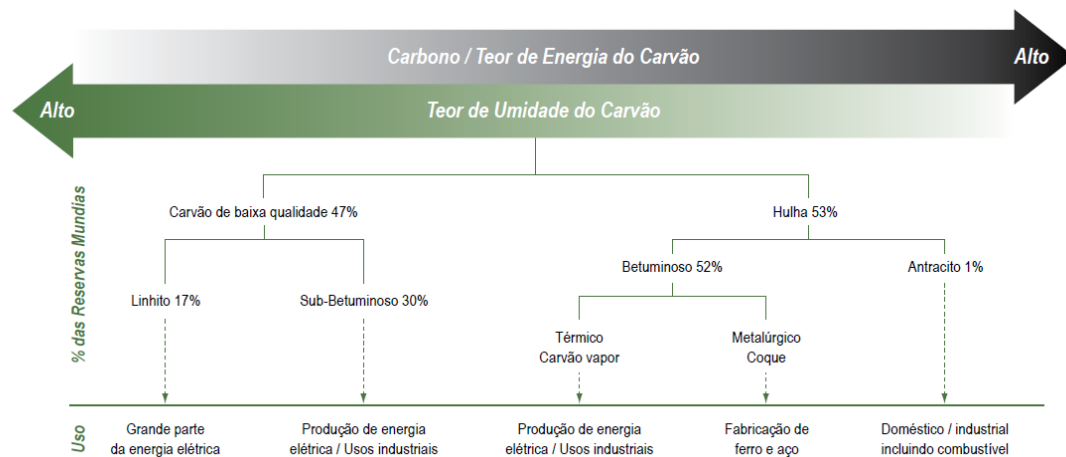


Figura 1 – Tipos de carvão, reservas e usos (ANEEL, 2009)

A figura acima apresenta o carvão metalúrgico como sendo o utilizado para a fabricação de ferro e aço. Contudo, CEPA (1999) afirma que outras formas de carvão mineral, como o antracito, podem ser usadas como redutores na siderurgia.

Em termos da participação na matriz energética mundial, segundo o Balanço Energético Nacional (2011), o carvão mineral foi, em 2008, responsável por cerca de 9,8% de todo o consumo mundial de energia e de 27% de toda a energia elétrica gerada. No âmbito mundial, apesar dos graves impactos sobre o meio ambiente, o carvão ainda é uma importante fonte de energia. As principais razões para isso são (ANEEL, 2004):

- abundância das reservas;
- distribuição geográfica das reservas;
- baixos custos e estabilidade nos preços, relativamente a outros combustíveis.

Borba (2001) afirmou que, no início do século XXI, cerca de 62% do carvão consumido no Brasil foi destinado à siderurgia, como observado no Gráfico 2 abaixo:

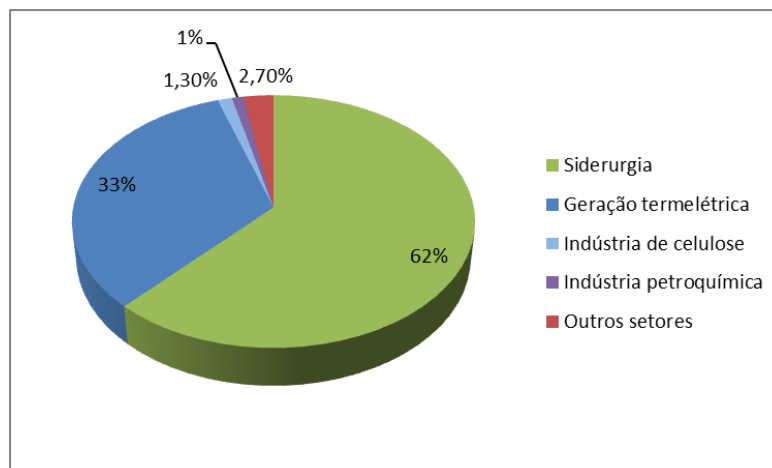


Gráfico 2 – Distribuição do uso de carvão mineral no Brasil

Com relação ao consumo industrial de carvão metalúrgico (carvão coqueificável, passível de ser modificado físico-quimicamente para ser usado na siderurgia), teve-se o aumento de 23,2% em 2010, em relação à 2009. Tal fato se deve à recuperação da siderurgia nacional, que registrou aumento de 23,8% na produção física de aço bruto (BEN, 2011).

No Brasil, as principais reservas de carvão mineral estão localizadas no Sul do País, notadamente no Estado do Rio Grande do Sul, que detém mais de 90% das reservas nacionais. No final de 2002, as reservas nacionais de carvão giravam em torno de 12 bilhões de toneladas, o que corresponde a mais de 50% das reservas sul-americanas e a 1,2% das reservas mundiais (ANEEL, 2004).

No que diz respeito ao consumo de carvão mineral brasileiro, Borba (2001) afirma que até o final da década de 80, as siderúrgicas brasileiras eram obrigadas a adquirir carvão coqueificável produzido em Santa Catarina, para mistura com o importado, o que não era desejado pela indústria, devido à má qualidade do coqueificável brasileiro. Em 1990, essa obrigatoriedade foi retirada, eliminando dessa forma o mercado do carvão brasileiro para uso siderúrgico, e, após um breve período de transição, a partir de 1991, não mais foi produzido no país esse tipo de carvão, restando a partir daí apenas uma pequena produção de carvão coqueificável para fundição (BORBA, 2001).

Os maiores impactos socioambientais do carvão decorrem de sua mineração, que afetam principalmente os recursos hídricos, o solo e o relevo das áreas em que se instalam e dos arredores. A abertura dos poços de acesso aos trabalhos de lavra, feita no próprio corpo do minério, e o uso de máquinas e equipamentos manuais, provocam a emissão de óxido de

enxofre, óxido de nitrogênio, monóxido de carbono e outros poluentes da atmosfera (ANEEL, 2004).

Durante a drenagem das minas, as águas sulfurosas são lançadas no ambiente externo, provocando a elevação das concentrações de sulfatos e de ferro e a redução de pH no local de drenagem(ANEEL, 2004).

Há ainda, segundo a ANEEL (2004), a geração de rejeitos sólidos durante o beneficiamento, que são depositados no local das atividades. As pilhas de rejeito são percoladas pelas águas pluviais, ocasionando a lixiviação de substâncias tóxicas, que contaminam os lençóis freáticos de grande parte das águas de bacias hidrográficas circunvizinhas.

Além dos referidos impactos da mineração, a queima de carvão em indústrias e termelétricas causa graves impactos socioambientais, em face da emissão de material particulado e de gases poluentes, dentre os quais se destacam o dióxido de enxofre (SO₂) e os óxidos de nitrogênio(NO_x). Além de prejudiciais à saúde humana, esses gases são os principais responsáveis pela formação da chuva ácida, que provoca a acidificação do solo e da água e, conseqüentemente, alterações na biodiversidade, corrosão de estruturas metálicas, elevação do efeito estufa, entre outros (ANEEL, 2004).

2.2.3 Coque de Carvão Mineral

O coque de carvão mineral é produzido pelo processo de coqueificação, pelo qual o carvão mineral, ao ser submetido a temperaturas da ordem de 1000°C na ausência de oxigênio, libera gases presentes em sua estrutura, originando um resíduo sólido de alto teor de carbono, poroso e infusível, que é o coque (BORBA, 2001).

Para produção do coque de carvão mineral, necessita-se do carvão mineral, gerado da atividade mineradora. Além dos impactos ambientais já mencionados da extração do carvão em mineradoras, o uso do coque tem como consequência a formação de novos depósitos de rejeitos, que chegam a cobrir muitos hectares de solos cultiváveis (ANEEL, 2004).

De acordo com Borba (2001), para a produção do coque deve-se realizar a combinação de carvões de várias procedências, para conduzir à obtenção de um coque de melhor qualidade, minimizar o custo e evitar a dependência de um único fornecedor. O processo ocorre na

ausência de oxigênio para evitar a combustão da mistura de carvões e o calor necessário para a coqueificação é fornecido de gás de alto-forno e gás de coqueria.

De acordo com Pinheiro (2004), as taxas de produtividade observadas em altos-fornos com coque de carvão mineral apresentam-se maiores se comparado ao carvão vegetal, devido os seguintes fatores:

- maior densidade, que faz aumentar o tempo de resistência da carga metálica e consequentemente o rendimento gasoso;
- maior resistência mecânica, que faz reduzir a degradação do coque (menor geração de finos e melhor permeabilidade);
- menor higroscopicidade comparado ao carvão vegetal, que absorve grande quantidade de água, que no interior do alto-forno provoca uma fragilização dos grãos que se rompem gerando grãos finos.

Esses fatores justificam a ampla utilização do coque de carvão mineral na indústria de ferro-gusa e aço.

Segundo a PETROBRAS (2011), a empresa produz o coque verde de petróleo em suas refinarias, que tem como diferencial o baixo teor de enxofre. “O combustível pode ser aplicado na metalurgia de ferro e aço, podendo substituir parcialmente os carvões minerais importados e o carvão vegetal” (PETROBRAS, 2011).

2.2.4 Óleo Combustível

O óleo combustível é um derivado do petróleo obtido no processo de refino. O produto é utilizado pela indústria para aquecimento de caldeiras e fornos, ou em motores de combustão interna para geração de calor (PETROBRAS, 2011). Bizzu (2005) afirma que o óleo combustível é muito importante nos processos de aquecimento industrial, devido seu preço baixo.

Barros (2004) classifica o óleo combustível em duas categorias, explicadas a seguir:

- óleos combustíveis de alto teor de enxofre: são os óleos normalmente empregados em combustão contínua;

- óleos combustíveis de baixo teor de enxofre: são utilizados nas indústrias em que o teor de enxofre é muito importante na qualidade do produto fabricado, como por exemplo, certos tipos de cerâmicas, vidros finos, metalurgia de metais não ferrosos; ou quando existem restrições governamentais de meio ambiente.

Com relação aos impactos ambientais, Santos (2002) cita que a combustão do óleo combustível emite fuligem, dióxidos de enxofre, causador da chuva ácida, e o gás carbônico, um dos causadores do efeito estufa.

2.2.5 Gás natural

O gás natural (GN) é definido como uma mistura de hidrocarbonetos leves⁹ que na temperatura ambiente e pressão atmosférica permanece no estado gasoso. O GN encontra-se acumulado em rochas porosas no subsolo, frequentemente associado ao petróleo, constituindo reservatórios naturais. Apresenta baixos teores contaminantes, tais como nitrogênio, dióxido de carbono, água e compostos de enxofre, com raras ocorrências de gases nobres (SCANDIFFIO, 2001).

Na indústria, o gás natural é utilizado como combustível para fornecimento de calor, geração de eletricidade e de força motriz e como matéria-prima nos setores químicos, principalmente para a produção de metanol, fertilizantes, amônia e ureia (PETROBRAS, 2011).

Na indústria química, o gás natural é utilizado para geração de vapor e em processos como fabricação de hidrogênio e aquecimento de fluido térmico. Além de aplicações convencionais para indústria química, o gás natural pode ser utilizado na cogeração de energia, devido à elevada quantidade de energia térmica e elétrica utilizada pelo setor. O gás natural é utilizado nos principais equipamentos deste segmento: caldeiras, fornos e incineradores. A indústria química necessita de grande quantidade de vapor para fabricação de produtos intermediários ou finais (COMGAS, 2005).

A COMGAS (2005) afirma que o gás natural pode substituir com vantagens os derivados de petróleo e parte da eletricidade utilizada no aquecimento.

Na indústria siderúrgica, o gás natural está presente em processos de obtenção do aço nas usinas integradas, coqueria, alto-forno, aciaria e laminação. Na fase de

⁹compostos químicos formados, exclusivamente, por átomos de carbono e hidrogênio.

acabamento, o gás natural é um energético muito mais econômico. Não necessita estocagem, o que elimina despesas com fretes e custos associados à área física de armazenagem. Além disso, oferece maior segurança: por ser mais leve que o ar, dissipa-se rapidamente em caso de vazamento (COMGAS, 2005).

Outra vantagem do gás natural, segundo a COMGAS (2005), é que ele proporciona mais velocidade e homogeneidade no aquecimento, diminuindo o tempo de permanência nos fornos e, conseqüentemente, os custos. Com o uso do gás natural, a vida útil e a produtividade dos fornos de fusão e tratamento térmico também aumentam significativamente.

Com relação à oferta de tecnologias a gás, o número de fornecedores nacionais é muito restrito para atender às especificidades de inúmeras aplicações industriais, o que pode trazer preocupações para a empresa, já que a sua única opção seria recorrer ao fornecedor estrangeiro. Isso acarretaria elevados custos logísticos, falta de assistência técnica especializada e elevadas taxas de importação (LIMA, 2007).

2.2.6 Alcatrão e outras fontes secundárias do petróleo

Segundo CEPA (1999), o alcatrão é um líquido viscoso obtido da destilação do carvão mineral para produção de gás combustível ou coque metalúrgico. Dentre os tipos de alcatrão, o alcatrão de hulha é o produto mais conhecido e comercializado, geralmente por siderúrgicas.

As outras fontes secundárias do petróleo são as fontes de energia resultantes de um ou mais processos de transformação do petróleo. De acordo com a Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo (ASPE, 2011), são fontes de energia secundária o óleo diesel, óleo combustível, gasolina, GLP (gás liquefeito de petróleo), querosene, entre outros. O BEN (2011) considera em seus cálculos as outras fontes secundárias de petróleo como sendo a gasolina, nafta, querosene, gás de refinaria, entre outros.

Tanto o alcatrão quanto as fontes secundárias do petróleo são combustíveis não renováveis e emitem dióxido de carbono em seus processos combustivos, além de compostos tóxicos gasosos.

2.2.7 Bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço da cana-de-açúcar é o resíduo sólido que remanesce da moagem da cana-de-açúcar nas usinas de açúcar e destilarias de álcool etílico no país. De um modo geral, o

material genético em uso no país apresenta um teor aproximado de 270 a 290 kg de bagaço (com 50% de unidade) em cada tonelada de cana processada (CONAB, 2011).

A produção do bagaço de cana é representativa no contexto brasileiro, uma vez que o país é o principal produtor de cana-de-açúcar do mundo e tem, no Estado de São Paulo, um complexo agroindustrial responsável por 60% da cana cultivada no País (COMITRE; DO CARMO, 2010).

Nas indústrias, o bagaço de cana pode ser utilizado como substituto dos derivados de petróleo e lenha (COMITRE; DO CARMO, 2010). De acordo com Andrade e Diniz (2007), a sua utilização como combustível reduz a necessidade de armazenamento do bagaço nas usinas de cana-de-açúcar, que apresenta problemas para a saúde dos operadores e impactos ambientais.

De acordo com Comitre e do Carmo (2010), o potencial energético produzido a partir da cana-de-açúcar pode subsidiar três questões fundamentais para o desenvolvimento do Brasil: a produção de energia de fonte renovável, geração de empregos temporários e uma fonte alternativa ao consumo de energia, garantindo a autonomia do País para enfrentar possíveis crises futuras.

Os principais impactos socioambientais do uso do bagaço de cana encontram-se na produção da cana-de-açúcar. Os impactos são apresentados a seguir (ANDRADE; DINIZ, 2007):

- redução da biodiversidade, causada pelo desmatamento e pela implantação de monocultura;
- contaminação das águas superficiais e subterrâneas e do solo, por meio da prática excessiva de adubação química, corretivos minerais e aplicação de herbicidas e defensivos agrícolas;
- compactação do solo, pelo tráfego de máquinas pesadas, durante o plantio, tratos culturais e colheita;
- assoreamento de corpos d'água, devido à erosão do solo em áreas de reforma;
- emissão de fuligem e gases de efeito estufa, na queima, ao ar livre, de palha, durante o período de colheita;

- danos à flora e fauna, causados por incêndios descontrolados;
- consumo intenso de óleo diesel, nas etapas de plantio, colheita e transporte;
- concentração de terras, rendas e condições subumanas do trabalho do cortador de cana.

Andrade e Diniz (2007) afirmam, contanto, que por se tratar de cultura adensada, a cana promove uma conservação eficaz do solo e, mesmo depois de colhida, a palha depositada protege o solo da erosão.

Com relação à emissão de gases tóxicos, a queima do bagaço de cana gera como principais poluentes: material particulado (MP), monóxido e dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio (ANDRADE; DINIZ, 2007).

2.2.8 Comparação entre o coque de carvão mineral e o carvão vegetal

No Brasil, cerca de 85% do total da produção nacional de carvão vegetal é consumido pela indústria de ferro e aço, enquanto os restantes 15% são consumidos por outros setores. O Brasil é o único país manter uma significativa produção de ferro e aço utilizando-se o carvão vegetal como agente redutor do minério de ferro. No restante do mundo, assim como na maior parte da produção siderúrgica brasileira, utiliza-se o coque de carvão mineral, desde que, em meados do século XIX, com a crescente escassez dos recursos florestais na Europa, encontrou-se nele uma alternativa para a indústria em expansão (GOVERNO FEDERAL, 2008).

Comparado ao carvão mineral, seu uso é menos favorecido devido à dificuldade de precificação quando do retorno dos investimentos em projetos de cultivo de eucalipto, que levam sete anos do plantio até o corte. Além disso, a logística da mineração brasileira inviabiliza, em parte, que o carvão vegetal seja utilizado como insumo no lugar do carvão mineral, pois grande parte da carga de carvão mineral importada da China retorna ao país em carregamentos de exportações de minério de ferro (MARCOVITCH, 2008).

Pinheiro (2004) constata que

[...] é importante que seja feita uma comparação das propriedades químicas, físicas e metalúrgicas do carvão vegetal e do coque de carvão mineral, já que tais características expressarão a capacidade do redutor de atender as solicitações às quais este é submetido no alto-forno.

Segundo o mesmo autor, as principais diferenças dos dois redutores são:

- Produtividade: são observadas taxas de produtividade inferiores, no caso do carvão vegetal, o que é explicado porque o coque tem maior densidade, maior resistência mecânica e menor higroscopicidade (absorve menos água do que o carvão vegetal);
- Tempo de residência da carga metálica: nos altos-fornos a carvão vegetal, a carga metálica ocupa 30% do volume do forno, enquanto que altos-fornos a coque, este volume é de 45%, o que torna o consumo de carbono menor no caso do coque;
- Volume e basicidade da escória: o carvão vegetal tem baixo teor de cinzas e de enxofre, o que permite a operação com um volume de escória ácida bem menor do que o coque de carvão mineral;
- Teor de enxofre no gusa: por possuir um teor de enxofre bem menor, o carvão vegetal produz ferro-gusa com teores da ordem de 0,5 kg/tonelada, volume bem menor do que o gusa produzido a partir de coque, que chega a ultrapassar 3,0 kg de enxofre por tonelada;
- Poder de eliminação de álcalis: Como a eliminação dos álcalis é fortemente influenciada pela basicidade da escória (quanto maior a basicidade, menor a taxa de eliminação), a formação de álcalis é maior em altos-fornos a coque;
- Influência de fatores climáticos: Por ser altamente higroscópico, o carvão vegetal tem forte influência de fatores climáticos, pois, em períodos chuvosos, há sensível queda na produtividade dos altos-fornos a carvão vegetal, pois aumenta a geração de finos, o que afeta negativamente a permeabilidade;
- Variabilidade do processo: por ter grande diversidade de origens, o carvão vegetal tem qualidade bastante heterogênea, ao contrário do que ocorre com o coque de carvão mineral. Com isso, há uma maior variabilidade, principalmente no nível térmico, no caso da utilização do carvão vegetal como redutor.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA E AÇO

As indústrias siderúrgicas atuais podem ser divididas em dois grandes grupos: usinas integradas e semi-integradas.

Usina integrada é aquela cujo aço é obtido a partir do ferro primário, isto é, a matéria-prima é o minério de ferro, que é transformado em ferro na própria usina, nos altos-fornos; o produto dos altos-fornos (ferro-gusa) é transformado em aço mediante conversão.

Usina semi-integrada é aquela cujo aço é obtido principalmente por ferro secundário, isto é, a matéria-prima é sucata de aço, não havendo necessidade da etapa de redução do minério de ferro. A sucata é transformada novamente em aço comercial, por meio do emprego de fornos elétricos de fusão; são recicladoras de aço (Mourão, 2007).

A Figura 2 ilustra um fluxo simplificado de produção de aço.

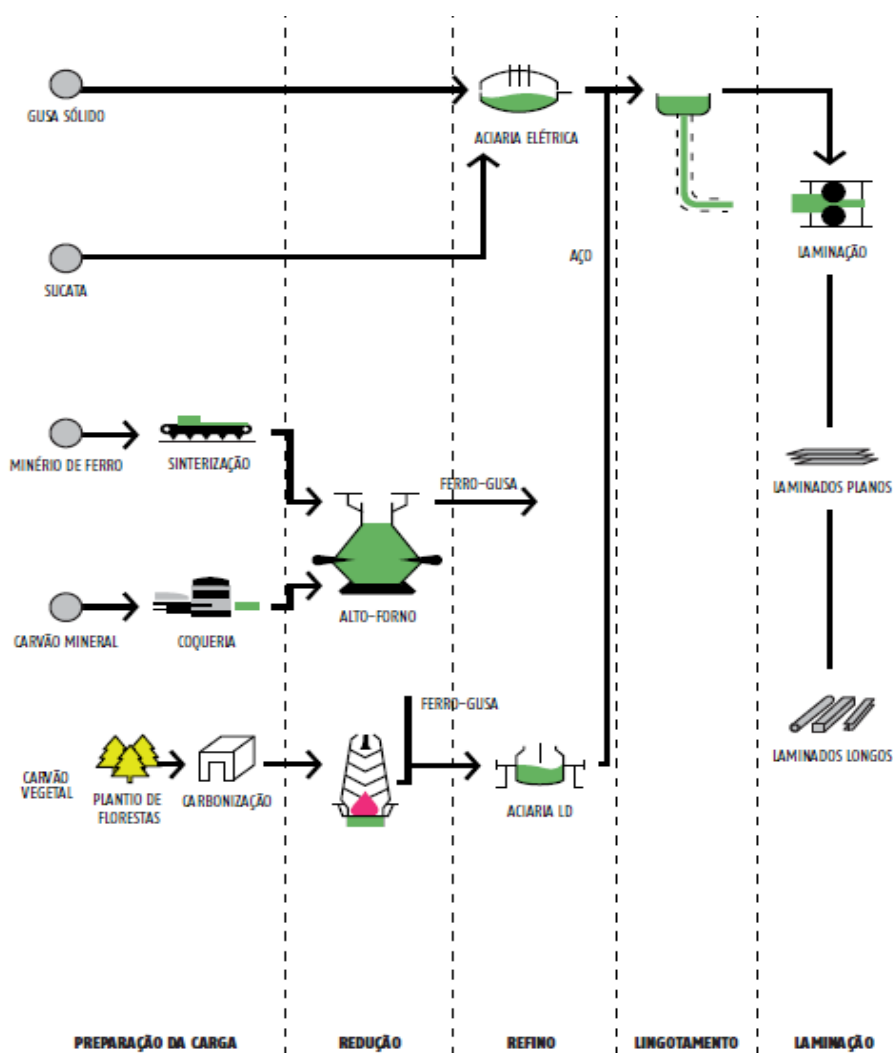


Figura 2 – Fluxo simplificado de produção do aço (IAB, 2013b)

Na Figura 2, são apresentadas duas técnicas de refino do aço:

- aciaria elétrica e
- aciaria LD (Conversor a Oxigênio ou Processo Linz-Donawitz).

Na primeira delas, as matérias-primas são a sucata e a gusa sólida, enquanto que a aciaria LD recebe a gusa líquida do alto-forno. Os produtos laminados são mostrados como exemplo de produto final do processo produtivo.

Na produção de ferro-gusa e aço, seja usando o carvão mineral ou o vegetal, ocorre a produção de escória como rejeito (formada pelas impurezas contidas no minério, associadas ao calcário), a qual pode ser aproveitada pela indústria cimenteira, dentre outros usos.

2.2.1 A evolução da produção de ferro-gusa e aço e dos combustíveis utilizados

A maneira para obtenção de ferro foi evoluindo com o tempo, mas o que ocorria basicamente era uma mistura de minério de ferro com o carvão vegetal a sopro (ou entrada de ar natural). A queima do carvão é responsável por gerar calor e gases redutores (CO), o que permite a redução dos óxidos de ferro e a produção de uma massa sólida de ferro com baixo teor de carbono, além de escória. Esse material era, então, aquecido e forjado para obtenção das formas adequadas para a sua utilização (JACOMINO et al., 2002).

Jacomino et al. (2002) afirmam que os primeiros fornos encontrados para produção de aço datam de 100 anos a.C., nos quais a entrada de ar para combustão do carvão vegetal acontecia naturalmente pela ventaneira. Os mesmo autores salientam que,

[...] no século IX, apareceram os chamados baixo-fornos, de seção circular, tornando o homem mais independente da ação do vento. Séculos depois surgiram as Forjas Catalãs, lareiras que passaram a dominar a produção de ferro. Entretanto, as temperaturas não eram altas o suficiente para a incorporação eficaz do carbono ao ferro, sendo produzidos somente o aço (que possui menor teor de carbono que o ferro-gusa). O ferro-gusa foi, primeiramente, obtido pelo alto-forno *Stuckofen*, precursor dos altos-fornos atuais. Mais alto que os fornos tradicionais da época, o alto-forno *Stuckofen* tinha maior volume para conter o carvão vegetal, atingia maiores temperaturas e maior tempo de residência do metal no forno, o que acarretava maior dissolução do carbono no ferro.

Conforme Martarelli et al. (2001), o primeiro alto-forno a produzir somente ferro-gusa líquido foi o *Flussofen*, ainda nos anos 1300. Para tanto, o ferro-gusa era fundido a uma

temperatura em torno de 1200 °C, obtendo-se uma mistura semi-sólida formada por partículas de aço com alguma escória agarrada. Depois de novamente aquecida em forno de carvão vegetal, essa massa metálica era forjada para aço em barra ou ferro forjado. Nascia assim, o processo indireto de obtenção de aço, tendo-se maior produtividade do que a obtenção direta pelos fornos de baixas temperaturas.

O último avanço significativo na produção de ferro-gusa em altos-fornos foi no século XVII, a partir do acionamento hidráulico dos foles com o uso de rodas d'água. Nesses fornos, o ferro fundido era armazenado em moldes conhecidos como *pigs* onde se solidificava, dando origem à denominação, em inglês, *pig iron* ao ferro-gusa sólido (JACOMINO et al., 2002).

Já no século XIX, desenvolveu-se o processo de aplicação do gás de alto-forno para pré-aquecer o ar soprado e foi utilizado pela primeira vez o gás emitido pelo alto-forno para elevar a temperatura de sopro (JACOMINO et al., 2002). Dessa forma, reduzia-se o consumo de combustível, tornando o processo mais eficiente.

Uma variação aos altos-fornos, que dispensa combustão de energéticos durante o processo produtivo, é o forno elétrico. Segundo Boas (1966), o desenvolvimento dos fornos elétricos começou no início do século XX e o calor produzido para refino do ferro-gusa líquido provém da corrente elétrica. O que resulta em menos impurezas e produz aços de alta qualidade. Entretanto, Boas (1966) ressalta que o tempo de refino é tão longo, que a operação em muitos casos é inviabilizada economicamente.

Com relação ao combustível utilizado na indústria de ferro-gusa e aço, Jacomino et al. (2002) informam que, com o aparecimento de leis restringindo a devastação de florestas, impostas, principalmente, pelo governo inglês, a indústria tentou utilizar o carvão mineral em substituição ao carvão vegetal. No início, as dificuldades para conseguir seu amolecimento e cozimento dentro do forno inibiam sua utilização. Contudo, com a transformação do carvão mineral em coque, foi possível utilizá-lo no alto-forno. Dessa forma, o coque de carvão mineral se tornou a maior fonte de energia do setor industrial de ferro-gusa e aço (BEN, 2010).

No Brasil, em 2000, 9% do carvão vegetal foi usado em residências (cocção) e 86% em indústrias, a maior parte na produção de ferro-gusa (BIODIESELBR, 2011), trazendo a necessidade de compreensão das tendências desse segmento para dimensionar o mercado desse combustível. Ademais, Soares et al. (2004) ressaltam que a utilização do carvão mineral tem sido uma alternativa energética para as siderúrgicas, além da própria alternativa de cogeração de energia que vem sendo praticada por algumas unidades fabris, tanto nesse segmento quanto em outros. Soares et al. (2004) afirmam que esse fato não significa uma

importância menor dos derivados da madeira como fonte energética para as empresas que os utilizam como insumo, mas deve-se atentar para a possibilidade de substituição do carvão vegetal por outras fontes de energia em situações em que a variação de preços compensar essa alternativa.

Vale lembrar ainda que, uma preocupação maior com a questão ambiental nos últimos anos tem levado as entidades governamentais, em menor escala, e, principalmente, as não governamentais a incentivarem formas de regulamentação do uso da biomassa. Por consequência, as ações ambientalistas vêm significando a possibilidade de fiscalização mais rigorosa no uso das florestas, especialmente no que tange ao controle sobre a devastação da mata nativa decorrente da busca pela madeira para comercialização, tanto sob sua forma *in natura* quanto processada. Portanto, a derrubada de florestas nativas para fins energéticos é uma atividade que desde 1992 não é mais permitida, sendo necessária a produção do carvão vegetal a partir do manejo florestal decorrente da atividade da silvicultura (SOARES et al., 2004).

Do ponto de vista financeiro, a participação desse insumo pode alcançar entre 50 e 60% dos custos totais de produção do ferro-gusa. Acima desse limite, sua produção torna-se economicamente inviável (SOARES et al., 2004).

2.2.2 O processo de redução de minério de ferro a ferro-gusa

Segundo Romeiro (1997), para que se obtenha o metal (em sua forma simples) a partir do minério, é necessário que o minério sofra uma redução, ou seja, o oxigênio deve ser removido, em geral, combinando-se com o carbono. De acordo com Thomaz, 2010, para produção do ferro-gusa em alto-forno são necessárias as seguintes matérias-primas:

- coque ou carvão,
- minério de ferro e
- calcário.

O carvão (ou coque) é o combustível e agente redutor para o processo de redução dos óxidos de ferro. Ele também tem a função de dar suporte à carga criando espaços apropriados de modo a garantir um bom escoamento dos gases e dos materiais fundidos. Para que se consiga esse papel, exige-se do carvão baixa reatividade e alta resistência física de maneira que não se degrade à medida que se desce do topo até a zona inferior do forno (ARAÚJO, 1997).

No caso do minério de ferro, a sua ocorrência na natureza é na forma de óxidos, carbonatos e sulfetos. Desses, os óxidos são os minérios que possuem maior percentual de ferro em massa, sendo encontrados, principalmente, nas formas de:

- hematita (Fe_2O_3),
- magnetita (Fe_3O_4) ou
- limonita ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).

O material utilizado como fundente é o calcário, que é uma combinação de cálcio com carbono e oxigênio. Sua função é auxiliar na fusão do minério de ferro (SENAI, 2013). Juntamente com as impurezas do minério forma a escória, que ficará líquida e se depositará na superfície do ferro-gusa, uma vez que sua densidade é menor.

O alto-forno, por sua vez, é um reator térmico no qual a carga sólida é descendente e os gases redutores ascendentes. É um equipamento contínuo e seu funcionamento é ininterrupto por anos (SALIERNO, 2007).

De acordo com Mourão, 2007, o alto-forno é carregado de matérias-primas ferrosas preparadas (sinter e pelotas) ou naturais (minério de ferro granulado); com um combustível e fonte de gás redutor (coque ou carvão mineral), e pode, também, ter injeções auxiliares pelas ventaneiras (óleo combustível, alcatrão, carvão pulverizado, gás natural, plásticos picotados, etc.). O objetivo é produzir uma liga, no estado líquido, composta de ferro (92% à 95%) e carbono (3,5% à 5,0%) e mais alguns elementos de liga (silício e manganês).

Na Figura 3 mostra-se o fluxo dos materiais dentro do reator.

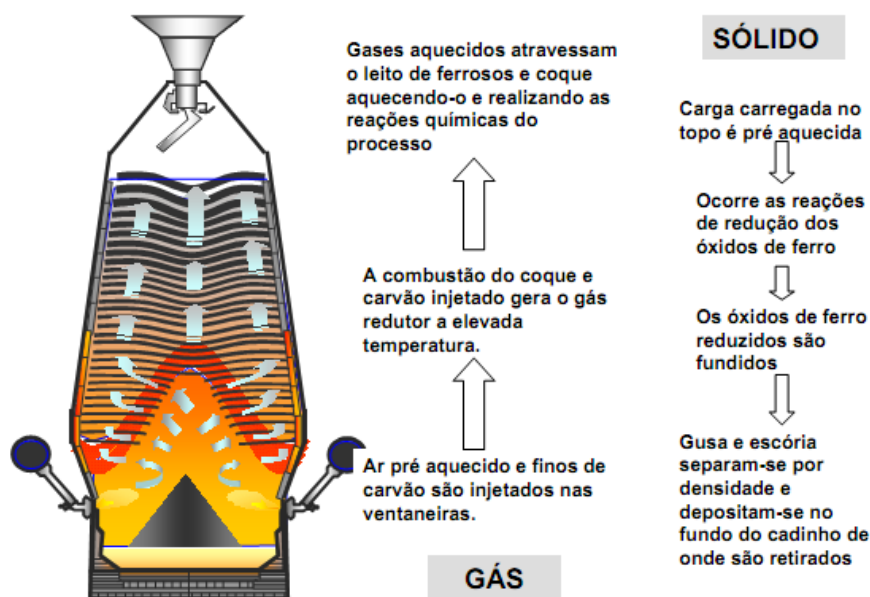


Figura 3– Fluxo de materiais dentro do alto-forno (SALIERNO, 2007¹⁰ apud ARAÚJO, 1997)

2.2.3 A produção de aço

De acordo com Ladgraf, Tschiptschin e Goldenstein (2004), como o ferro puro tem ponto de fusão acima de 1.500 °C, a redução do óxido resulta em ferro metálico sólido, quando realizado abaixo daquela temperatura. Se as condições químicas no interior do forno forem tais que o ferro seja enriquecido em carbono, ocorre um abaixamento do ponto de fusão e pode-se obter ferro líquido a 1.200 °C, chamado, no passado, de ferro coado e, hoje, de gusa ou ferro fundido (IPCC, 1996).

Com esse material só se pode fundir peças, porque ele não suporta forjamento¹¹. Já o ferro com baixo teor de carbono (até 2% em massa) é dúctil, sendo conhecido anteriormente como ferro trabalhado, ferro maleável, hoje, genericamente, como aço (LADGRAF; TSCHIPTSCHIN; GOLDENSTEIN, 2004).

O aço é produzido por remoção de impurezas, como o carbono do ferro bruto ou do ferro-gusa, produzido pelos altos-fornos. O processo industrial principal é o de oxigênio, no qual a gusa ou a sucata fundida é colocada num contentor de tijolos alcalinos (básicos)

¹⁰SALIERNO, G.F. Sistema de monitoramento do desempenho dos altos-fornos a carvão vegetal. UFOP, Ouro Preto, 2007.

¹¹Operação de conformação mecânica efetuada com esforço de compressão sobre um material dúctil, de tal modo que ele tenda a assumir o contorno ou perfil da ferramenta de trabalho.

revestido com resistências elétricas. Faz-se então baixar um tubo ou uma lança, até próximo da superfície do metal fundido, pelo qual se faz passar oxigênio puro a alta pressão. A superfície do metal é assim agitada e as impurezas presentes neste são oxidadas (sofrem combustão completa) (INFOPÉDIA, 2013). A Figura 4 a seguir apresenta o conversor a oxigênio utilizado na produção do aço.

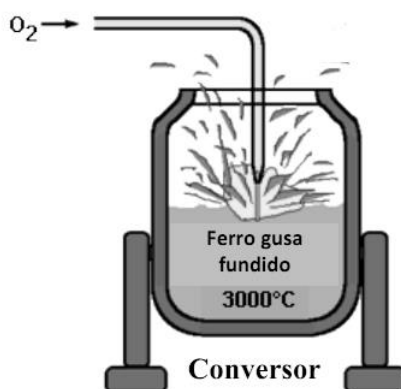


Figura 4– Conversor a oxigênio para remoção de impurezas e produção do aço (THOMAZ, 2010)

Outro processo de produção do aço é o processo de Siemens-Martin, descrito pelo Infopédia, 2013, que consiste num processo de fabricação muito antigo no qual o ferro fundido, em conjunto com pedras calcárias, é colocado numa taça ou recipiente pouco fundo. É então feito passar pela superfície do metal óleo em chamas ou gás, levando à oxidação das impurezas.

Os aços de alta qualidade são feitos em fornos elétricos. Faz-se passar uma corrente elétrica muito elevada pelos eletrodos no forno, o que provoca a fusão da sucata de aço e do ferro. Os fornos elétricos são também utilizados para refinar o aço, produzindo os aços extra puros utilizados, por exemplo, na indústria petroquímica (INFOPÉDIA, 2013).

O aço produzido é moldado em lingotes¹², que podem ser trabalhados, quando quentes, com martelo (forjando-o) ou por compressão entre rolos de maneira a obter folhas de aço. Os semiacabados, lingotes e blocos são processados por equipamentos chamados laminados e transformados em uma grande variedade de produtos siderúrgicos, cuja nomenclatura depende de sua forma e/ou composição química (IAB, 2013a).

¹²Um lingote é uma massa de um determinado metal que após sofrer aquecimento acima de seu ponto de fusão, é despejado em um molde, para tomar a forma que torna mais fácil o seu manuseio (GOUVEIA, R., 2012)

Salienta-se que tanto o processo de redução de minério de ferro a ferro-gusa quanto a produção de aço emitem gases do efeito estufa.

2.2.4 A indústria brasileira de ferro-gusa e aço

A primeira siderurgia latino-americana foi construída no Brasil, no ano de 1818, e dispunha de dois altos-fornos a base de carvão vegetal (BOAS, 1966). Contudo, o primeiro ferro-gusa líquido foi produzido no país em 1813, utilizando um alto-forno, afirmam Jacomino et al. (2002).

Em sua obra, Jacomino et al. (2002) relatam que, em 1937, foi inaugurada no Brasil a maior usina integrada a carvão vegetal do mundo, introduzindo uma visão pioneira na América do Sul: o reflorestamento à base de eucaliptos para suprir a demanda de carvão vegetal nos altos-fornos.

Segundo Matarelli, Lopes e Castro (2001), em 1957, com a implantação da indústria automobilística no País, o setor de gusa experimentou significativa ascensão, fabricando grandes quantidades de metal fundido para atender à produção de motores e de outros componentes fundidos para veículos. O crescimento foi rápido e desordenado, de modo que entre 1960 e 1966 o preço do ferro caiu e muitos fornos foram desativados. A partir de 1970, muitos mini fornos a carvão vegetal foram construídos em Minas Gerais, em função do *boom* mundial da siderurgia.

Com a crise mundial de energia a partir de 1973, o carvão vegetal ganhou nova dimensão como agente redutor de fonte renovável e as exportações do ferro-gusa se tornaram crescentes. De 1989 a 1992, o Brasil viveu uma crise recessiva e a produção e as vendas de ferro-gusa caíram a uma taxa média de 10% ao ano, mas as vendas internas voltaram a se estabilizar de 1997 a 2000, e as exportações cresceram (MATARELLI; LOPES; CASTRO, 2001).

O principal minério encontrado no país é a hematita com 50 a 70% de ferro (do qual o Brasil possui 8% das reservas mundiais), sendo de boa qualidade devido aos baixos índices de fósforo e enxofre (ROMEIRO, 1997).

Com relação à produção brasileira de aço bruto na América Latina, sabe-se que o país produziu, em janeiro de 2011, a maior quantidade de aço, equivalente a 2806×10^3 toneladas.

O Gráfico 3 ilustra os seis países latino-americanos que mais produziram aço bruto no primeiro mês desse ano. Observa-se que o Brasil é o maior produtor, seguido do México (com 1440×10^3 t).

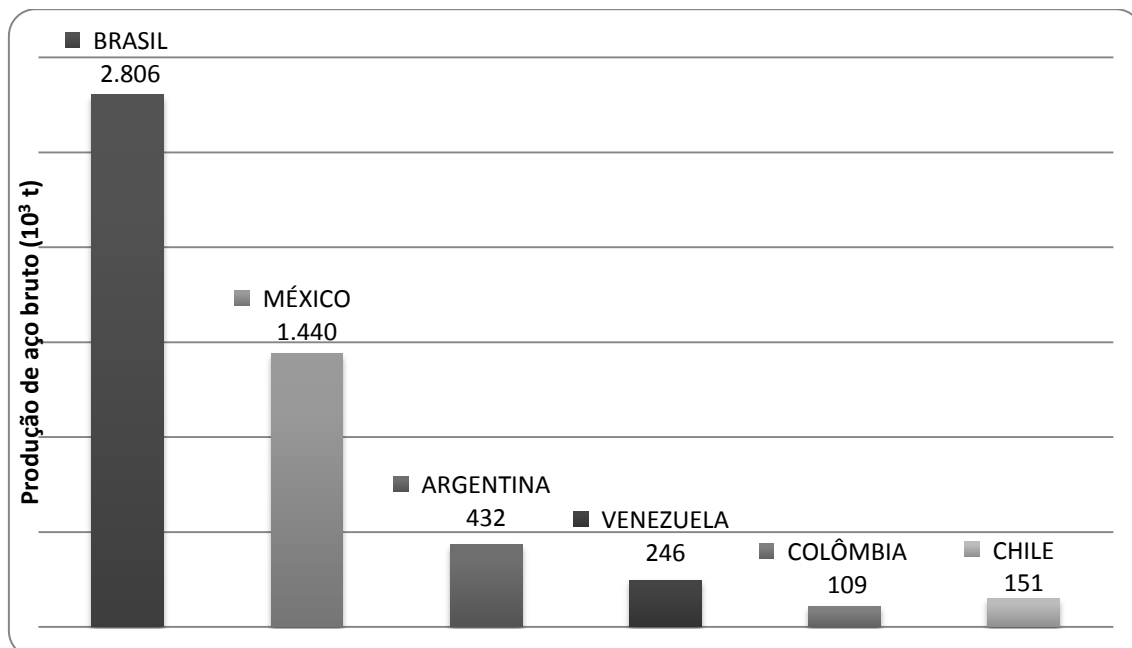


Gráfico 3– Produção de aço bruto na América Latina em janeiro de 2011 (IAB, 2011)

O Instituto Aço Brasil (IAB, 2011) quantificou, ainda, a produção brasileira de aço bruto no período de janeiro de 2010 a fevereiro de 2011, em 10^3 toneladas. Como resultado, obteve que houve ligeira redução da produção no final do ano de 2010, com o aumento da produção no início deste ano.

De acordo com Jacomino et al. (2002), o Estado de Minas Gerais é o maior centro brasileiro de ferro-gusa em unidades independentes de produção. A produção se baseia, essencialmente, a partir do minério de ferro explorado no Quadrilátero Ferrífero¹³. Segundo Jacomino et al. (2002), a extensa produção de ferro-gusa do Estado, aliado a produção de leite e derivados, ocasiona graves agressões à atmosfera e aos recursos hídricos.

Representa-se no Gráfico 4, a seguir, o perfil da produção estadual brasileira, durante os dois primeiros meses de 2011. Observa-se que, neste período, a participação na produção de aço, do Estado de Minas Gerais, foi a maior no país, com 33% da produção nacional.

¹³O Quadrilátero Ferrífero foi assim denominado devido aos vastos depósitos de minério de ferro que ocorrem numa área limitada, aproximadamente, pelas linhas que ligam Itabira, Rio Piracicaba, Mariana, Congonhas do Campo, Casa Branca e Itaúna (QUADRILÁTERO, 2011).

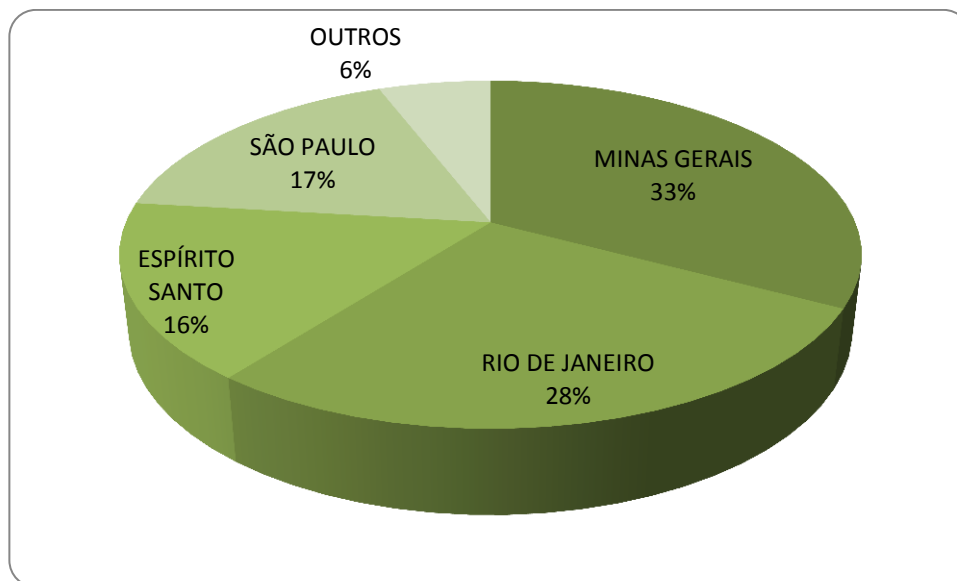


Gráfico 4 – Distribuição regional da produção de aço bruto (IAB, 2011)

2.2.5 Combustíveis utilizados pelo setor de ferro-gusa e aço

A estatística energética nacional é divulgada no Balanço Energético Nacional (BEN), do Ministério de Minas e Energia (MME), no qual o setor siderúrgico brasileiro é considerado na parcela contábil de “Ferro-gusa e Aço”.

O setor industrial escolhido para o presente estudo foi o de ferro-gusa e aço, por ter grande representatividade no consumo de energia no país, sendo responsável por cerca de 20% do consumo final de energia do setor industrial (BEN, 2011), além de consumir elevadas quantidades de combustíveis fósseis em seus processos.

A evolução no uso de combustíveis para fins energéticos pelo setor, de 2001 a 2010, pode ser evidenciada na Tabela 1.

Tabela 1– Consumo de combustível do setor industrial de ferro-gusa e aço

IDENTIFICAÇÃO	UNIDADE: 10 ³ tep									
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
GÁS NATURAL	781	900	911	936	1.113	1.105	1.214	1.158	866	1.170
CARVÃO MINERAL	1.587	1.902	2.182	2.455	2.374	2.352	2.516	2.655	2.048	2.536
ÓLEO DIESEL	22	35	36	40	44	40	14	14	14	15
ÓLEO COMBUSTÍVEL	103	105	117	79	82	107	145	142	114	168
GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO	105	81	82	56	100	85	88	97	77	71
NAFTA	0	0	0	0	0		0	0	0	0
QUEROSENE	2	2	1	1	1	1	0	0	1	0
GÁS DE COQUERIA	891	879	972	1.037	1.016	980	1.039	1.065	1.011	1.231
GÁS CANALIZADO	0	0	0	0	0		0	0	0	0
COQUE DE CARVÃO MINERAL	6.221	6.582	6.470	6.574	6.067	5.763	6.320	6.289	4.969	5.897
ELETRICIDADE	1.200	1.289	1.382	1.452	1.397	1.452	1.579	1.602	1.279	1.431
CARVÃO VEGETAL	3.439	3.561	4.057	4.902	4.804	4.636	4.775	4.679	2.724	3.372
ALCATRÃO / OUTRAS SEC. PETRÓLEO	415	392	492	413	462	464	551	528	533	746
TOTAL	14.767	15.729	16.701	17.945	17.459	16.985	18.241	18.229	13.636	16.637

Fonte: BEN (2011)

Verifica-se uma tendência de crescimento no uso de energéticos pelo setor de 48,3%, no período de 2001 a 2008. Entretanto, o ano de 2009 apresentou um recuo no consumo de combustíveis, evidenciado pela crise financeira internacional, em que a indústria foi a principal responsável pela retração na demanda de energia no Brasil, com queda de 23,5% em relação a 2008 (BEN, 2011). Ainda assim, o setor industrial continuou a ser o maior consumidor, imediatamente seguido por transportes e setor energético. Em 2010, o consumo de combustível voltou a aumentar, sendo o maior registrado desde 2001.

De acordo com o BEN (2011), em 2010, ano de referência do presente trabalho, o subsetor de ferro-gusa e aço apresentou 36% de consumo de energia a partir do coque de carvão mineral e 15% a partir do carvão mineral, como ilustrado no Gráfico 5.

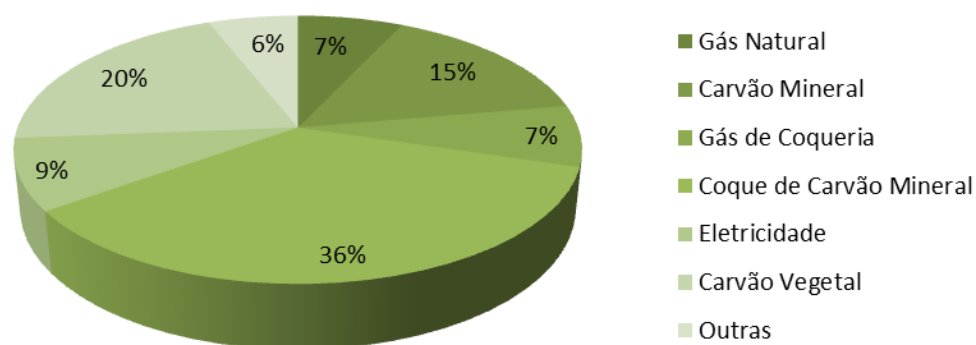


Gráfico 5– Consumo energético do setor ferro-gusa e aço em 2010 (BEN, 2011)

A relação completa do consumo de combustíveis do setor, em toneladas equivalentes de petróleo (tep), é representada na Tabela 2 a seguir. Os resultados apresentados foram extraídos da Tabela 1, destacando o ano de 2010.

Tabela 2 – Consumo de energia no setor de ferro-gusa e aço em 2010

Fontes de energia	Consumo (10³ tep)
Gás natural	1170
Carvão mineral	2.536
Óleo diesel	15
Óleo combustível	168
Gás liquefeito de petróleo	71
Nafta	0
Querosene	0
Gás de coqueria	1.231
Gás canalizado	0
Coque de carvão mineral	5.897
Eletricidade	1.431
Carvão vegetal	3.372
Alcatrão / outras sec. Petróleo	746
Total	16.637

Fonte: BEN (2011)

2.2.6 Emissões de GEE no processo produtivo

Na Tabela 2 são apresentadas as unidades de produção de ferro-gusa e aço onde são emitidos GEE.

Tabela 2 – GEE da produção de ferro-gusa e aço

Unidade – planta	Produtos	GEE emitidos
Coqueria	Coque	NO _x
Sinterizações	<i>Sinter</i>	CO/CO ₂ /SO ₂ /NO _x
altos-fornos	gusa-líquido	CO/CO ₂ /NO _x
Calcinações	cales, dolomitas calcinadas	CO ₂
Refino primário	aço líquido	CO/CO ₂
Refino secundário	aço líquido (tratado)	CO/CO ₂
Laminações	chapas, bobinas, tiras	CO/CO ₂ /SO ₂ /NO _x

Fonte: Adaptado de Mourão, 2007¹⁴

¹⁴ CO: monóxido de carbono; CO₂: gás carbônico; SO_x: óxidos de enxofre (SO₂ e SO₃); NO_x: óxidos de nitrogênio (NO₂ e NO₃).

As etapas apresentadas por Mourão, 2007 são:

- Coqueria: onde o coque de carvão mineral é produzido pelo processo de coqueificação.
- Sinterização: processo de aglomeração dos minérios de ferro em um minério com granulometria entre 0,1 à 9,5 mm, camado de *sinter*.
- altos-fornos: redução do minério de ferro e produção do ferro-gusa.
- Calcinação: processo de decomposição de carbonatos e para eliminação da água de hidratação, para a formação de fundentes (cal, dolomita etc.).
- Refino primário e secundário: consistem na eliminação de impurezas indesejáveis e na eliminação das segregações (homogeneização da estrutura).
- Laminação: processo de conformação para produção de placas, tiras, folhas, chapas, etc.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA QUÍMICA

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUM), representante do setor industrial de produtos químicos, a indústria química é fornecedora de matérias-primas e produtos para todos os setores produtivos, da agricultura ao aeroespacial. A Associação agrupa os produtos químicos em dois grandes blocos (ABIQUM, 2010):

- produtos químicos de uso industrial: produtos inorgânicos, produtos orgânicos, resinas e elastômeros, produtos e preparos químicos diversos;
- produtos químicos de uso final: produtos farmacêuticos, higiene pessoal, perfumaria e cosméticos, adubos e fertilizantes, sabões, detergentes e produtos de limpeza, defensivos agrícolas, tintas, esmaltes e vernizes, entre outros.

Devido à natureza de seus produtos, Asbahr (2006) afirma que o risco ambiental é intrínseco às unidades industriais químicas em razão da natureza do processo produtivo, das matérias primas e insumos utilizados e dos tipos de resíduos gerados. Os riscos ambientais mais comuns na indústria química são explosões e vazamento de gases, incêndios, armazenamento, transporte e manipulação de substâncias tóxicas, bem como emissões de poluentes que contaminam o ar, as águas e o solo.

Assim sendo, Asbahr (2006) mostra em sua pesquisa alguns indicadores da qualidade ambiental do processo produtivo do setor. Entre eles, estão a emissão de CO₂ e o consumo de combustíveis fósseis, que serão melhor explorados na presente pesquisa.

O uso de combustíveis tem seu foco no aquecimento de matéria-prima em caldeiras, fornos e incineradores. Os energéticos são amplamente utilizados na geração de vapor e aquecimento de fluidos, podendo, ainda, serem utilizados como matérias-primas para o produto final (COMGAS, 2005).

2.3.1 Descrição do perfil da indústria química brasileira

Segundo o *ranking* da indústria química mundial representado na Tabela 3, a indústria química brasileira está em sétima posição em relação a seu faturamento em 2010, equivalente a 130 bilhões de dólares.

Tabela 3 – Ranking da indústria química mundial

PAÍS	FATURAMENTO (bilhões US\$)
CHINA	903
ESTADOS UNIDOS	720
JAPÃO	338
ALEMANHA	229
CORÉIA	139
FRANÇA	137
BRASIL	130
ÍNDIA	125
ITÁLIA	105
REINO UNIDO	94
RÚSSIA	83
HOLANDA	73
ESPANHA	70

(ABQUIM, 2010)

A indústria química brasileira deverá faturar US\$ 158,5 bilhões em 2011, o que representará crescimento de 23,4% frente ao ano passado. O déficit na balança comercial brasileira de produtos químicos, contudo, será recorde, alcançando US\$ 25,9 bilhões. Os dados foram divulgados no Encontro Anual da Indústria Química, realizado no dia 12 de dezembro (ABIQUIM, 2011).

De acordo, com o SEBRAE (2009), o setor tem uma projeção média de crescimento no Brasil de 4% ao ano, o qual que deve ser responsável pela oferta de 50% do total mundial de químicos verdes (produzidos de maneira sustentável) até 2020.

A ABIQUIM (2011) apresenta o Gráfico 6 – Participação do setor industrial no PIB brasileiro (%), referente à participação das indústrias no PIB brasileiro no ano de 2009, em porcentagem.



Gráfico 6 – Participação do setor industrial no PIB brasileiro (%)

Observa-se que o setor industrial de produtos químicos obteve a quarta maior participação no PIB industrial, no ano de 2009.

2.3.2 Combustíveis utilizados pelo setor de produtos químicos

O setor industrial de produtos químicos tem uma participação de cerca de 9% do consumo de combustíveis de todo o setor industrial (BEN, 2011) e, diferente do setor de ferro-gusa e aço, tem como principal combustível o gás natural e outras fontes secundárias do petróleo. A evolução no uso de combustíveis pelo setor industrial, de 2001 a 2010, pode ser evidenciada na Tabela 4.

Tabela 4– Consumo de combustível do setor industrial de produtos químicos

IDENTIFICAÇÃO	UNIDADE: 10 ³ tep									
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
GÁS NATURAL	1.368	1.630	1.651	2.063	2.159	2.236	2.218	2.323	1.762	2.289
CARVÃO VAPOR	75	71	77	73	116	63	69	92	66	125
LENHA	52	42	47	49	50	52	51	51	45	49
BAGAÇO DE CANA	143	139	141	101	96	98	0	95	84	93
ÓLEO DIESEL	76	119	137	149	133	137	152	154	136	27
ÓLEO COMBUSTÍVEL	1.085	929	739	643	622	643	481	476	476	233
GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO	18	17	18	20	21	61	62	66	60	64
NAFTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
QUEROSENE	1	1	3	1	0	0	0	0	0	0
GÁS CANALIZADO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ELETRICIDADE	1.420	1.524	1.629	1.859	1.814	1.880	1.985	1.901	1.957	2.151
CARVÃO VEGETAL	0	0	19	16	17	17	17	17	18	20
OUTRAS SECUNDÁRIAS PETRÓLEO	2.119	2.124	2.085	2.141	2.139	2.178	2.622	2.033	2.170	2.391
TOTAL	6.357	6.595	6.547	7.115	7.168	7.364	7.657	7.209	6.774	7.443

Fonte: BEN (2011)

No período de 2001 a 2010, verificou-se um crescimento no uso de energéticos pelo setor de 17,1%. Entretanto, o ano de 2009 apresentou um recuo no consumo de combustíveis, assim como evidenciado pela indústria de ferro-gusa e aço, devido à crise financeira internacional (BEN, 2011). Observa-se que no ano de 2010 o consumo de energia voltou a aumentar, alcançando 7443×10^3 tep, sendo ultrapassado, somente, no ano de 2007, no qual nota-se o consumo de 7657×10^3 tep.

Com relação ao combustível utilizado, constata-se que a participação do óleo combustível teve uma redução acentuada, passando de um uso de 1085×10^3 tep em 2001 para 233×10^3 tep em 2010. Outras fontes, como o gás natural, a eletricidade e o carvão vapor apresentaram um aumento considerável do consumo entre 2010 e 2001.

De acordo com o BEN (2011), em 2010, o subsetor de produtos químicos apresentou 31% de consumo de energia a partir do gás natural e 32% a partir de outras fontes secundárias do petróleo, como ilustrado no Gráfico 7 – Consumo energético do setor químico em 2010 (BEN, 2011).

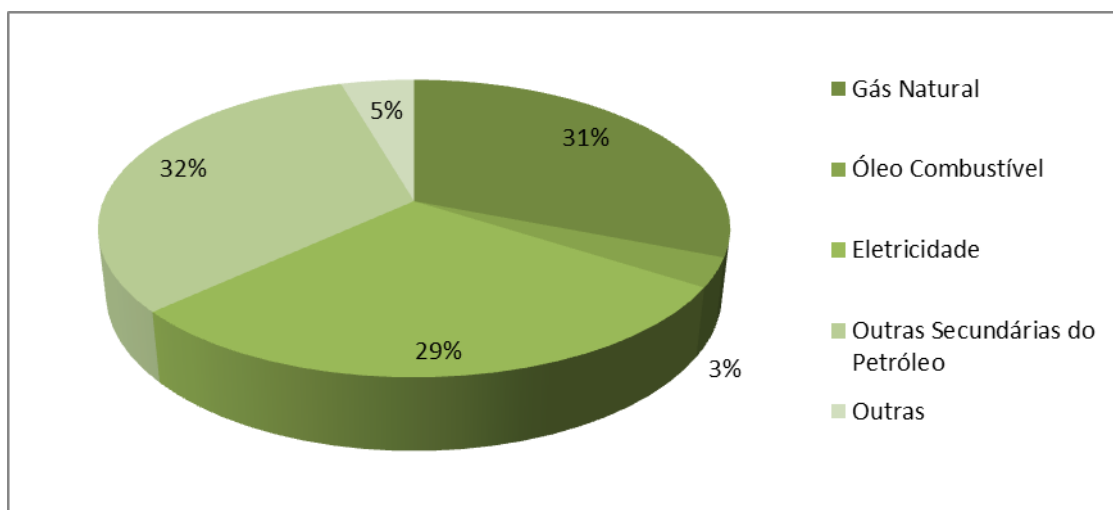


Gráfico 7 – Consumo energético do setor químico em 2010 (BEN, 2011)

A relação completa do consumo de combustíveis do setor de produtos químicos, em toneladas equivalentes de petróleo (tep), é representada, a seguir, na Tabela 5. Os resultados apresentados, nesta tabela, foram extraídos da Tabela 4, destacando o ano de 2010.

Tabela 5– Consumo de energia no setor químico em 2010

Fontes de energia	Consumo (10 ³ tep)
Gás Natural	2.289
Carvão Vapor	125
Lenha	49
Bagaço De Cana	93
Óleo Diesel	27
Óleo Combustível	233
Gás Liquefeito De Petróleo	64
Nafta	0
Querosene	0
Gás Canalizado	0
Eletricidade	2.151
Carvão Vegetal	20
Outras Secundárias Petróleo	2.391
Total	7.442

Fonte: BEN (2011)

3 MÉTODO

O dióxido de carbono é produzido quando os combustíveis à base de carbono são queimados. Estimativas das emissões nacionais e por setor são feitas com base nas quantidades de combustíveis utilizadas e o teor de carbono dos combustíveis (IPCC, 1996).

A metodologia *top-down* de mensuração das emissões atmosféricas de CO₂ é utilizada nesse trabalho com o intuito de quantificar as emissões da produção de ferro-gusa e aço e as emissões hipotéticas a partir de outros combustíveis, que seriam potenciais substitutos energéticos. Tal metodologia foi selecionada devido à menor complexidade de obtenção dos dados e por sua confiabilidade (SIMÕES, 2003).

Segundo o MCT (2006a), as emissões de dióxido de carbono por queima de combustíveis pela abordagem *top-down* do IPCC abrange as seguintes etapas:

- I. Determinação do consumo aparente dos combustíveis, nas unidades de medida originais;
- II. Conversão do consumo aparente para uma unidade de energia comum, terajoules (TJ)¹⁵;
- III. Transformação do consumo aparente de cada combustível em conteúdo de carbono, mediante a sua multiplicação pelo fator de emissão de carbono do combustível;
- IV. Determinação da quantidade de carbono de cada combustível destinada a fins não energéticos e a dedução dessa quantidade do carbono contido no consumo aparente, para se computar o conteúdo real de carbono possível de ser emitido;
- V. Correção dos valores para se considerar a combustão incompleta do combustível e computar a quantidade de carbono realmente oxidada na combustão;
- VI. Conversão da quantidade de carbono oxidada em emissões de CO₂.

A equação geral da metodologia para emissões anuais de CO₂ pode ser descrita pela seguinte equação:

$$\omega = 10^{-3} \cdot [(\theta \cdot \phi \cdot \gamma) - \eta] \cdot \lambda \cdot 44/12 \quad \text{Equação (1)}$$

¹⁵1 Terajoule = 10¹² Joules

Em que:

ω = emissão anual real de CO₂ (Gg CO₂)¹⁶

θ = consumo aparente do combustível no país

φ = fator de conversão da unidade original para terajoules (TJ/unidades originais)

γ = fator de emissão de carbono por unidade de energia contida no combustível

(t C/TJ)

η = quantidade anual de carbono estocada em produtos não energéticos (t C)

λ = fração do carbono realmente oxidado na combustão

A equação está definida com base no cálculo das emissões de determinado setor industrial, levando em consideração seu consumo no país. Como o que se procura no presente trabalho é uma representação do setor industrial de ferro-gusa e aço e o de produtos químicos, é necessária a obtenção de dados referentes ao estudo em questão.

3.1 O CONSUMO APARENTE DE COMBUSTÍVEL

De acordo com Simões (2003), o consumo aparente representa a quantidade de combustível disponível no país. Este autor, em seu trabalho sobre o transporte aéreo brasileiro, considerou na composição do consumo aparente, dados como a produção, a importação e a exportação anual de energia. Entretanto, no presente trabalho é utilizado o consumo direto do setor em estudo, com o objetivo de representar as emissões específicas desse segmento industrial.

Serão utilizados, como referência, os consumos dos principais combustíveis utilizados na produção industrial e o consumo total do setor, com base nas informações do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2011.

¹⁶ 1 Gigagrama = 10⁹ gramas

3.2 CONVERSÃO PARA UMA UNIDADE COMUM DE ENERGIA

A conversão do consumo aparente de cada combustível, medido na sua unidade original, para uma unidade comum de energia, é efetuada multiplicando-se o consumo aparente pelo fator de conversão (BARROS, 2004). A unidade comum de energia adotada pelo IPCC é o terajoule.

O fator de conversão considera, em seu valor, a conversão da energia de Poder Calorífico Superior (PCS) para Poder Calorífico Inferior (PCI). O uso do PCI do combustível, ao invés do seu PCS, é necessário, pois os fatores de emissão de carbono recomendados pelo IPCC, em quantidade de carbono por unidade de energia, são definidos com base na energia efetivamente aproveitável do combustível.

O conteúdo energético dos combustíveis pode ser obtido no BEN em toneladas equivalentes de petróleo (tep), tendo como base os seus PCSs. Para realizar a conversão em TJ multiplica-se por $45,217 \times 10^{-3}$ e em PCI, usa-se um fator de correção. A fórmula simplificada para a correção é:

$$\text{Fator de Conversão} = 45,217 \times 10^{-3} \cdot \text{fator de correção}$$

Em que o *fator de correção* é igual a 0,95 para os combustíveis sólidos e líquidos e 0,90 para os combustíveis gasosos (MCT, 2006a).

3.3 FATORES DE EMISSÃO DE CARBONO

Os fatores de emissão de carbono¹⁷ representam a quantidade de carbono contida no combustível por unidade de energia (MCT, 2006a). Os valores utilizados serão aqueles indicados pelo BEESP (2006), apresentados na Tabela 6, uma vez que caracterizam melhor as condições do país.

¹⁷Carbon Emission Factors (CEFs)

Tabela 6– Fatores de emissão de carbono segundo o BEESP

Fontes de energia	Fator de emissão (t de C/TJ)
Petróleo	20,0
Carvão Vapor	26,8
Gás Natural	15,3
Óleo Diesel	20,2
Óleo Combustível	21,1
Gasolina	18,9
GLP	17,2
Nafta	19,0
Querosene	19,6
Gás Canalizado	19,0
Gás de Coqueria	18,2
Coque de Carvão Mineral	29,5
Gás de Refinaria	16,5
Outros Energéticos de Petróleo	18,4
Lenha/Carvão Vegetal	29,9
Álcool Etílico	16,8

Fonte: BEESP (2006)

De acordo com as recomendações do IPCC (1996), os fatores de emissão de carbono para biomassa líquida e gasosa podem ser utilizados como referência, até que o fator de emissão de carbono específico do combustível seja determinado. Desta forma, neste trabalho, para os combustíveis renováveis provenientes da biomassa serão utilizados os dados do IPCC, conforme a Tabela 7.

Tabela 7– Fatores de emissão de carbono segundo o IPCC

Fontes de energia	Fator de emissão (t de C/TJ)
Antracito	26,8
Biomassa sólida	29,9
Biomassa líquida	20
Biomassa gasosa	20,6

Fonte: IPCC (1996)

3.4 O CARBONO ESTOCADO

Nem todo combustível suprido a um país destina-se ao setor energético. Parte dele é utilizada como matéria-prima na manufatura de produtos não energéticos, em que o carbono torna-se estocado, tais como, plásticos e asfalto, etc (MCT, 2006a). Na metodologia do IPCC, deve-se subtrair o carbono estocado do carbono do consumo aparente dos combustíveis.

O cálculo do carbono estocado requer a determinação das quantidades de combustíveis destinadas ao setor não energético e das frações dessas quantidades que efetivamente se mantêm estocadas aos bens produzidos.

Segundo a metodologia do IPCC, o carbono estocado para cada combustível é determinado como

$$\eta = 10^{-3} \cdot \rho \cdot \varphi \cdot \gamma \cdot \phi$$

Em que:

η = carbono estocado (Gg C)

ρ = quantidade de combustível com uso não energético (tep)

φ = fator de conversão de tep para TJ (TJ/tep)

γ = fator de emissão de carbono (t C/TJ)

ϕ = fração de carbono estocada

Entretanto, no presente trabalho é utilizado como referência o consumo de fontes de energia de setores industriais específicos, em que os dados fornecidos pelo BEN são os consumos finais de uso energético. Logo, o único valor relevante para o cálculo das emissões será do carbono não oxidado, que será explicado na etapa seguinte.

3.5 A COMBUSTÃO INCOMPLETA

A diferença entre o carbono contido no consumo aparente de combustível e aquele estocado em produtos não energéticos representa o carbono disponível para ser emitido na combustão. Porém, nem todo esse carbono será oxidado, uma vez que, na prática, a

combustão nunca ocorre de forma completa, deixando inoxidada uma pequena quantidade de carbono contida nas cinzas e outros subprodutos (MCT, 2006a).

A metodologia do IPCC considera esse fato na contabilização das emissões reais, e realiza a multiplicação do carbono disponível para a emissão pela fração de carbono oxidada na combustão.

A fração de carbono oxidada será obtida do BEESP (2006), que considera que para todos os energéticos (exceto a nafta) apenas 95% do carbono é transformado em CO₂, uma vez que parte desse carbono:

- fica retido nas cinzas ou não é oxidado;
- é incorporado como produto não energético.

3.6 CONVERSÃO DA QUANTIDADE DE CARBONO OXIDADA EM EMISSÕES DE CO₂

A conversão da quantidade de carbono oxidada para quantidade total de dióxido de carbono emitido é realizada pela multiplicação das emissões de carbono por 44/12. Em que 44 é a massa molecular do dióxido de carbono (CO₂) e 12 é a massa molecular do carbono (C).

3.7 REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

As etapas da metodologia de quantificação do IPCC para obtenção das emissões atmosféricas de gás carbônico são apresentadas na forma de tabelas, nas quais a emissão final de gás carbônico será representada em Gg de CO₂. Nestas constam os principais combustíveis utilizados nas indústrias de ferro-gusa e aço e química.

A mesma metodologia é implementada para elaboração de cenários que comparem o quanto se emitiria em CO₂ a partir da substituição de um ou mais energéticos por outros. Nesta parte do trabalho serão utilizados os dados de consumo de energia por combustível e será suposto que outro energético é utilizado em seu lugar.

O consumo total também será analisado, supondo que todo o consumo energético seja suprido com apenas um combustível. Nesse caso, as suposições realizadas servirão apenas para análise da grandeza dos valores calculados e como efeito de comparação entre as emissões de CO₂ dos energéticos estudados.

3.8 VALOR PRESENTE

O Método do Valor Presente será usado nessa pesquisa para possibilitar a análise da viabilidade econômica em se investir em um novo combustível na indústria de ferro-gusa e aço.

De acordo com Rebelatto (2004), o Valor Presente (VP) é o valor de um capital que, aplicado a uma dada taxa de juros (i), por um determinado prazo (n), produz um certo montante no final do período (Valor Futuro - VF) (REBELATTO, 2004). A equação do VP, a juros compostos, é indicada como:

$$VP = \frac{VF}{(1 + i)^n}$$

Para o cálculo do valor presente do investimento em carvão vegetal foi utilizada a fórmula do valor presente de uma série uniforme antecipada, descrita por Rebelatto (2004), o que representa uma série de termos constantes em que o primeiro pagamento ocorre no início do primeiro período. Esse é o caso da compra carvão mineral e vegetal, onde o pagamento é efetuado antes da utilização do combustível.

Calculam-se, com os dados de custo do energético e da quantidade utilizada anualmente, as entradas e saídas de caixa. Assim sendo, têm-se como entrada os custos com o combustível substituído e com a manutenção dos equipamentos e, como saída, os custos com o novo energético utilizado. O fluxo de caixa é definido como:

$$\text{Fluxo de caixa} = \text{entradas de caixa} - \text{saídas de caixa}$$

Para a taxa referente ao custo do capital investido (i), adotar-se-á uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA), que é o parâmetro para aceitação ou rejeição de um projeto de investimento (REBELATTO, 2004), pesquisada em literatura.

A fórmula utilizada para encontrar o Valor Presente (VP) do capital investido em uma série uniforme antecipada é:

$$VP = PMT \frac{(1 + i)^n - 1}{(1 + i)^{n-1} \cdot i}$$

Em que:

PMT = Pagamentos de Mesmo Valor (fluxos anuais);

i = taxa mínima de atratividade;

n = horizonte de tempo considerado no fluxo de caixa.

4 RESULTADOS

4.1 INDÚSTRIA DE FERRO-GUSA E AÇO

4.1.1 *As emissões de CO₂ da indústria de ferro-gusa e aço*

Com base no consumo de energéticos fornecidos pelo BEN (2011) e com a escolha da metodologia *top-down* do IPCC, procedeu-se com a quantificação das emissões atmosféricas de CO₂ no setor industrial de ferro-gusa e aço, para o ano de 2010. Os combustíveis analisados foram aqueles com maior participação no consumo do setor. Como disposto na Tabela 2, os energéticos mais consumidos são: gás natural, carvão mineral, óleo combustível, GLP, gás de coqueria, coque de carvão mineral e carvão vegetal. Quantidades consideráveis de alcatrão e outras fontes secundárias do petróleo também foram observadas. As emissões por eletricidade não foram consideradas nas quantificações, pois dependem da forma de geração de energia (hidráulica, térmica, nuclear, eólica, etc).

Vale ressaltar que, no caso de indústrias que produzem os combustíveis renováveis que consomem, por meio da reposição da biomassa utilizada no processo produtivo, consideram-se nulas as emissões de gás carbônico pelos processos combustivos. No entanto, tal característica de captura do CO₂ não foi mensurada nos cálculos efetuados.

As etapas necessárias para obtenção do resultado final foram dispostas nas Tabelas 8 e 9, como representadas a seguir.

Tabela 8– Etapas I, II e III da metodologia de quantificação das emissões de CO₂ para a indústria de ferro-gusa e aço

	Etapa I	Etapa II		Etapa III		
Combustível	Consumo (tep)	Fator de conversão (TJ/tep)	Consumo (TJ)	Fator de emissão de carbono (tC/TJ)	Conteúdo de carbono (t C)	Conteúdo de carbono (Gg C)
Coque de carvão mineral	5897000	0,043	253312	29,5	7472716	7472,716
Carvão vegetal	3372000	0,043	144848	29,9	4330959	4330,959
Carvão mineral	2536000	0,043	108937	25,8	2810569	2810,569
Gás de coqueria	1231000	0,041	50096	18,2	911746	911,746
Gás Natural	1170000	0,041	47614	15,3	728487	728,487
Óleo Combustível	168000	0,043	7217	21,1	152271	152,271
Gás Liquefeito de petróleo	71000	0,041	2889	17,2	49697	49,697
Alcatrão / Outras Sec. Petróleo	746000	0,043	32045	22,9	733837	733,837

Tabela 9– Etapas IV, V e VI da metodologia de quantificação das emissões de CO₂ para a indústria de ferro-gusa e aço

	Etapa IV		Etapa V		Etapa VI	
Combustível	Carbono estocado (Gg C)	Emissão líquida de carbono (Gg C)	Fração oxidada	Emissão de carbono (Gg C)	Emissão de CO ₂ (Mt CO ₂)	Emissão de CO ₂ (%)
Coque de carvão mineral	-	7472,716	0,95	7099,080	26,030	43
Carvão vegetal	-	4330,959	0,95	4114,411	15,086	25
Carvão mineral	-	2810,569	0,95	2670,041	9,790	16
Gás de coqueria	-	911,746	0,95	866,158	3,176	5
Gás Natural	-	728,487	0,95	692,062	2,538	4
Óleo Combustível	-	152,271	0,95	144,657	0,530	1
Gás Liquefeito de petróleo	-	49,697	0,95	47,212	0,173	0
Alcatrão / Outras Sec. Petróleo	-	733,837	0,95	697,145	2,556	4

Reitera-se que os valores são calculados em escala anual e é considerado todo o território brasileiro.

Assim sendo, foi possível elaborar o Gráfico 8, que apresenta a participação de cada combustível nas emissões de CO₂ no setor industrial de ferro-gusa e aço.

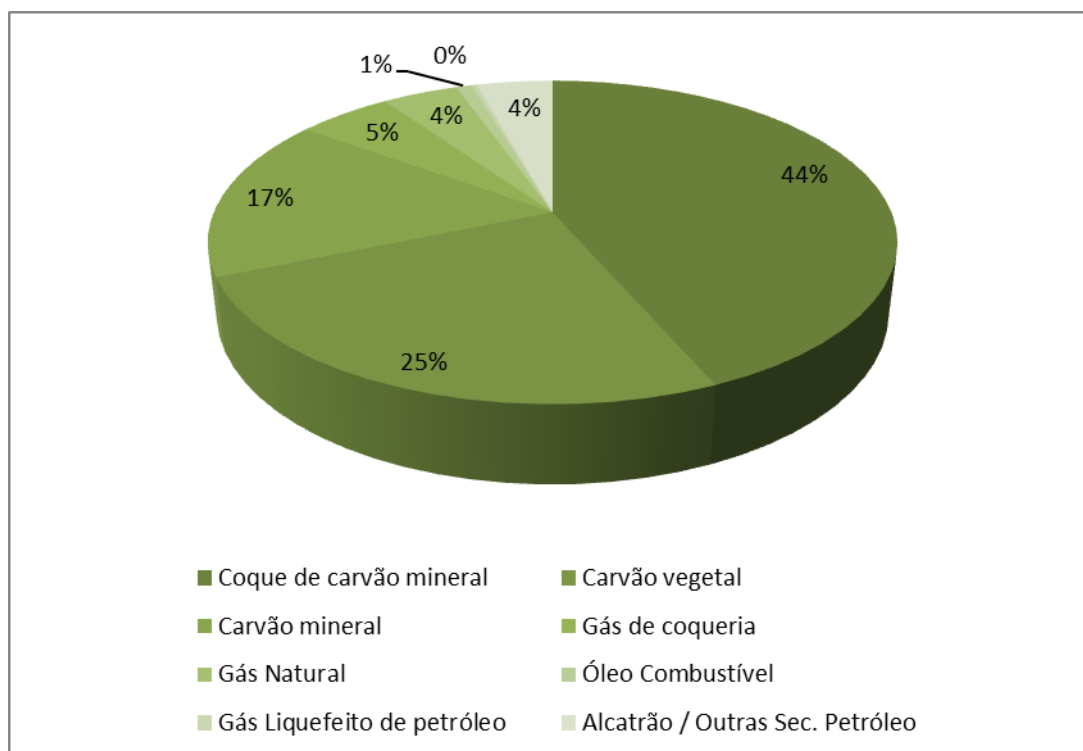


Gráfico 8 – Emissões de CO₂ por combustível na indústria de ferro-gusa e aço

Observa-se que, dos combustíveis mais utilizados no setor de ferro-gusa e aço, o coque de carvão mineral é o maior responsável pelas elevadas emissões atmosféricas de CO₂ da atividade industrial. O combustível emitiu 26,0 Megatoneladas¹⁸ (Mt) de CO₂, correspondendo a 44% do total das emissões. O carvão vegetal contribui com 25% (15,1Mt CO₂) das emissões nacionais do setor em estudo, seguido do carvão mineral, com 17% (9,8Mt CO₂).

A emissão total de CO₂, somadas as quantidades emitidas de todos os combustíveis utilizados, foi de 59,9Mt.

Pela análise dos resultados obtidos, sabe-se que o carvão vegetal teve amplo uso na indústria brasileira. Sabendo que o setor industrial possui tecnologia e capacidade operacional em utilizá-lo, o carvão vegetal apresenta-se com um potencial substituto renovável para os combustíveis fósseis. Uma vez que os combustíveis não renováveis, carvão mineral e coque de carvão mineral, possuem um consumo elevado e corresponderam a 69% das emissões de CO₂, em 2010, percebe-se que a substituição desses energéticos traria grandes modificações à quantidade de dióxido de carbono emitido na atmosfera.

¹⁸1Megatonelada = 10⁶ toneladas

Para efeito de comparação e melhor compreensão da metodologia *top-down* do IPCC, procedeu-se com as quantificações, realizando-se suposições do consumo de energia por fonte.

4.1.2 Uso de um combustível para suprir toda a demanda energética

Inicialmente, será suposto que todo o consumo energético da indústria brasileira de ferro-gusa e aço é abastecido por apenas um combustível. De acordo com BEN (2011), o consumo total para o ano de 2010 foi de 15191×10^3 tep. Desconsiderou-se, nesse total, o consumo por eletricidade, a qual não é foco da pesquisa. Fixando este consumo para cada combustível utilizado na indústria (etapa I da metodologia), é possível estimar quanto se emitiria se matriz energética fosse substituída por este combustível. A Tabela 10 a seguir, mostra o resultado obtido das emissões de CO₂ de cada combustível, supondo que o mesmo fosse utilizado como suprimento para toda demanda energética do setor.

Tabela 10– Emissões de CO₂ considerando consumo total do setor por apenas um combustível.

Combustível	Emissão de CO ₂ (Mt CO ₂)
Carvão vegetal	74,4
Coque de carvão mineral	73,4
Carvão mineral	64,2
Alcatrão / Outras sec. petróleo	57,0
Óleo combustível	52,5
Gás de coqueria	42,9
Gás liquefeito de petróleo	40,6
Gás natural	36,1

Nota-se que os combustíveis que mais emitem gás carbônico, para o mesmo consumo de energia são, respectivamente, o carvão vegetal, o coque de carvão mineral e o carvão mineral. Analisando somente as emissões de CO₂, percebe-se que, dentre os combustíveis analisados, os gasosos se mostraram menos poluentes. É possível observar que o gás natural emite menos da metade de CO₂, se comparado com o coque de carvão mineral e o carvão vegetal. Isso ocorre devido o fator de conversão e pelo fator de emissão de carbono.

No caso dos combustíveis sólidos e líquidos, o fator de conversão é maior em comparação aos gasosos, o que resulta em maior quantidade de energia liberada na forma de calor e maiores valores de CO₂ gerado.

Mais considerável do que o fator de conversão, é o fator de emissão de carbono. Nos combustíveis gasosos esse valor, que é multiplicado pelo consumo, em TJ, varia de 15,3 (gás natural) para 17,2 (gás liquefeito do petróleo - GLP). No caso dos combustíveis sólidos ele chega a 29,9 (carvão vegetal) e para o óleo combustível, atinge o valor de 21,1. Sendo menor o fator de emissão de carbono, menor é o valor de gás carbônico emitido.

A partir da quantidade de CO₂ emitida pelos combustíveis, supondo que os mesmos sejam utilizados na indústria de ferro-gusa e aço de forma exclusiva, e do consumo total real do setor com sua matriz energética diversificada, elaborou-se o Gráfico 9 a seguir.

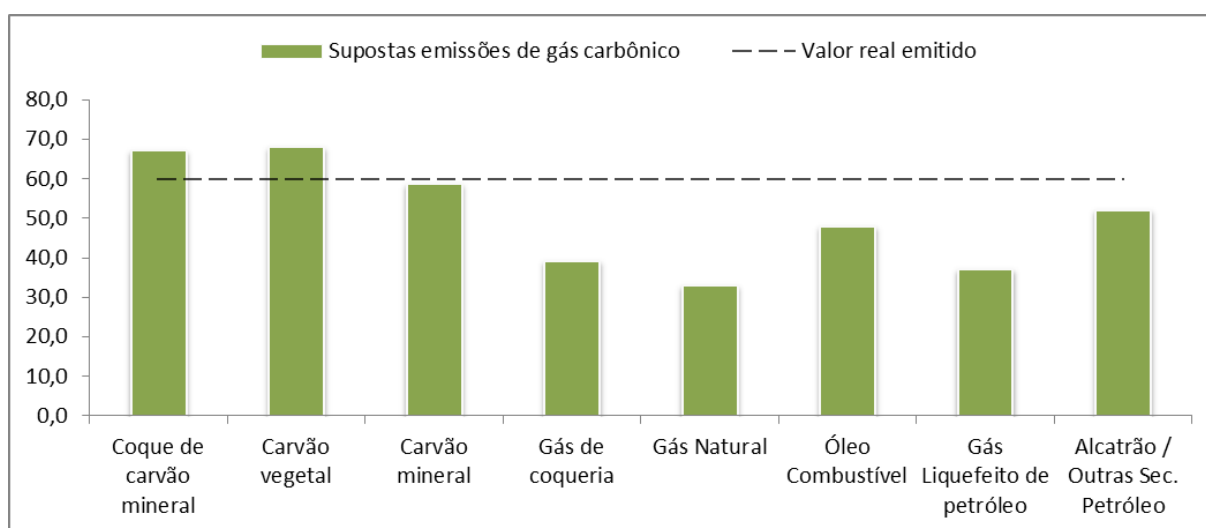


Gráfico 9 – Emissões de CO₂ supondo o consumo de apenas um combustível (em Mt de CO₂)

*O consumo de energia por eletricidade não foi computado na estimativa do valor real emitido.

Observa-se que, se fosse possível utilizar apenas um combustível na indústria de ferro-gusa e aço para suprir sua demanda energética, as emissões de CO₂ seriam menores para os combustíveis gasosos, líquidos, o carvão mineral e o alcatrão e outras fontes secundárias do petróleo. Sendo que, para os dois últimos tipos de combustíveis, as emissões estariam bem próximas das emitidas no período em estudo.

Nota-se que, se mantido o mesmo consumo energético, o carvão vegetal é o maior emissor de gás carbônico, seguido do coque de carvão mineral. Entretanto, a metodologia *top-down* do IPCC não considera em seus cálculos a condição de combustível renovável do

carvão vegetal, que absorve CO_2 da atmosfera no desenvolvimento da planta que gera a lenha necessária para produzir o carvão. Portanto, o uso do carvão vegetal ao invés de um combustível fóssil, pode contribuir para a redução do aquecimento global, desde que o mesmo seja proveniente de mata de reflorestamento destinadas para a atividade industrial.

O coque de carvão mineral, diferente do carvão vegetal, não é um combustível renovável, ou seja, sua reposição é inviável em curto período de tempo. Assim sendo, sua oferta como energético é limitada, o que pode ocasionar falta de suprimento na indústria em longo prazo. Da mesma forma, a produção do coque de carvão mineral não irá absorver o CO_2 emitido na escala de tempo humana, fazendo com que sua concentração na atmosfera aumente ainda mais, contribuindo para a elevação do efeito estufa com consequências a nível global. O mesmo pode ser dito do carvão mineral e dos outros combustíveis não renováveis (óleo combustível, gás de coqueria, gás liquefeito do petróleo, gás natural, alcatrão e outras fontes secundárias do petróleo), que embora emitam menos gás carbônico para suprir a mesma demanda energética, possuem suas reservas naturais limitadas em curto período de tempo.

4.1.3 Substituição de dois dos três combustíveis mais utilizados

Outra suposição possível de ser realizada é a substituição de uma fonte de energia por outra. O mais importante nessa etapa é avaliar os principais combustíveis utilizados na indústria e estimar as emissões de CO_2 de cada um deles, supondo que o mesmo seja o principal energético utilizado no setor. Assim, é possível implementar políticas que incentivem o uso de um combustível em substituição de outro mais poluente.

De acordo com o BEN (2011), o coque de carvão mineral, o carvão vegetal e o carvão mineral são responsáveis por 71% da demanda de combustíveis do setor. Os mesmos emitiram, em 2010, cerca de 86% de todo gás carbônico lançado na atmosfera pelo setor industrial brasileiro. Dessa forma, realizam-se suposições para o caso de um desses combustíveis ser utilizado exclusivamente, considerando que os outros dois sejam completamente substituídos pelo primeiro. Tais situações serão descritas a seguir.

Supondo a substituição do carvão mineral e vegetal pelo coque de carvão mineral, as emissões totais de CO_2 do setor industrial passariam de 59,9 Mt para 61,1 Mt de CO_2 .

No caso da utilização do carvão vegetal ao invés do carvão mineral e do coque de carvão mineral, as emissões aumentariam para 61,8Mt de CO_2 .

Se o carvão mineral fosse adotado como principal combustível, em substituição do coque e do carvão vegetal, as emissões de CO₂ diminuiriam para 54,5 Mt.

Para melhor comparação dos resultados, fez-se o Gráfico 10, a seguir, que demonstra as emissões de CO₂, considerando o uso do coque de carvão mineral, do carvão vegetal ou do carvão mineral como principais combustíveis.

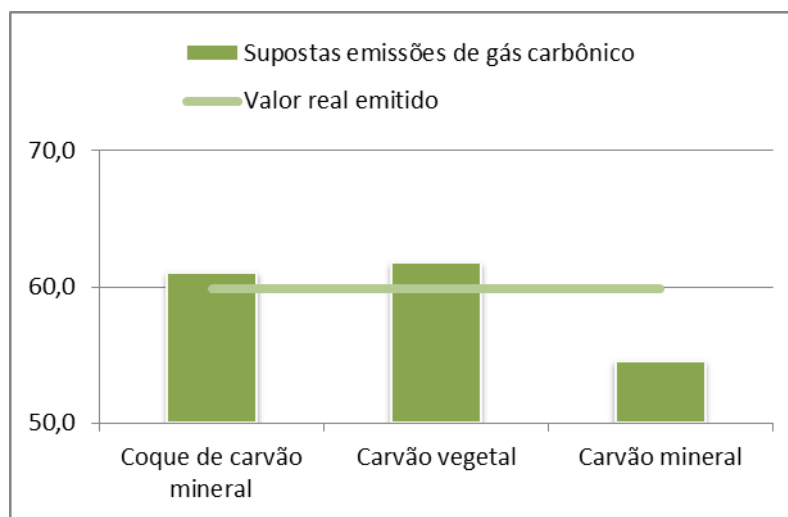


Gráfico 10 – Emissões de CO₂ supondo substituição de dois combustíveis sólidos (em Mt de CO₂)

A partir do Gráfico 10, fica evidente que o combustível que emite menos gás carbônico e que melhor contribuiria para a redução das emissões no processo industrial é o carvão mineral.

O carvão vegetal mostrou-se o maior poluente, o que se deve, principalmente, ao seu fator de emissão maior do que o dos outros dois combustíveis. Como já foi citado anteriormente, a metodologia utilizada nessa pesquisa não considera o fator de combustível renovável do carvão vegetal, o que garante que o CO₂ seja repostado em sua forma orgânica e em oxigênio.

Quando se afirma que o carvão vegetal repõe o CO₂ emitido na atmosfera em sua cadeia produtiva, refere-se ao carvão vegetal obtido de áreas reflorestadas e certificadas. A derrubada de florestas nativas para fins energéticos, ao contrário, desmataria a vegetação nativa, comprometendo a capacidade do carvão vegetal em contribuir para a redução do efeito estufa.

Assim sendo, mesmo o carvão mineral sendo indicado como menor emissor de GEE, o mesmo não reduz o gás carbônico da atmosfera num ritmo compatível com o desenvolvimento humano, contribuindo com o aquecimento global.

4.1.4 Análise da viabilidade econômica da substituição do coque de carvão mineral por carvão vegetal

Um das proposições mais favoráveis para a redução das emissões de GEE é a substituição de combustíveis não renováveis por fontes renováveis de energia. Nesse item, será estudada a viabilidade econômica da substituição do coque de carvão mineral por vegetal, com o objetivo de auxiliar na tomada de futuras decisões financeiras. O coque e o carvão vegetal foram escolhidos nessa análise devido as grandes quantidades consumidas para o setor, correspondendo a 43,3 % e 21,4% do total de combustíveis utilizados em 2011, respectivamente (BEN, 2012).

Sendo o processo de redução do minério de ferro em altos-fornos o que mais utiliza esses combustíveis, analisou-se a substituição de fontes de energia nessa etapa da produção de ferro-gusa e aço.

O método escolhido para o estudo da viabilidade econômica foi o Valor Presente (VP). Os cálculos foram feitos com base no consumo de carvão vegetal, no ano de 2011, da empresa siderúrgica Vallourec & Mannesmann Tubes (V&M), disponível em seu Relatório de Sustentabilidade de 2011.

A V&M utiliza dois altos-fornos na Usina de Barreiro, MG (V&M, 2006) que consumiram, juntos, cerca de 329.000 toneladas de carvão vegetal em 2011 (V&M, 2011).

Calculando a quantidade, em tep, consumida pelo carvão vegetal, é possível estimar quanto se consumiria de carvão mineral, em toneladas, para a mesma produção. Para tanto, foram utilizados os fatores de conversão, de 0,646 (carvão vegetal) e de 0,740 (carvão mineral), indicados pelo BEN (2011). Tem-se, dessa maneira:

$$\text{Consumo de carvão vegetal, em tep} = 329000 \frac{t}{\text{ano}} \times 0,646 \frac{\text{tep}}{t} = 212534 \frac{\text{tep}}{\text{ano}}$$

$$\text{Consumo de carvão mineral, em t} = 212534 \frac{\text{tep}}{\text{ano}} \div 0,740 \frac{\text{tep}}{t} = 287208 \frac{t}{\text{ano}}$$

Dessa forma, tem-se:

- consumo de carvão vegetal = 329.000 ton/ano;
- consumo de carvão mineral = 287.208 ton/ano.

De acordo com a USIMINAS (2013), o tempo médio de campanha (vida útil) do alto-forno é, em média, de 15 anos (informação verbal)¹⁹.

Será considerada a taxa mínima aceitável da empresa de 10%, baseada em duas análises de projetos no setor siderúrgico (OZORIO; BASTIAN-PINTO; BAYDIA, 2010; BAOBAB RESOURCES, 2013), sendo uma delas apresentada por uma empresa mineradora, em Moçambique, e a outra, no X Encontro Brasileiro de Finanças, em São Paulo.

Inicialmente, é necessário conhecer o preço dos energéticos a serem substituídos, assim como os custos com o investimento inicial envolvidos com a troca de equipamentos, manutenção, entre outros.

Considera-se aqui a compra de carvão mineral para a formação de coque pelo processo de coqueificação. O custo do carvão mineral (carvão médio importado da Austrália) é definido pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2012), como sendo de 109,66 US\$/t (valor de dezembro de 2011) ou R\$ 241,25, para a cotação do dólar em 2,20 reais.

O carvão vegetal, segundo o SEFAZ (2013) custa R\$ 475,00 por tonelada (valor de abril de 2013), já com os impostos incluídos.

Procedeu-se com o cálculo do custo anual com combustível, mostrado na Tabela 11.

Tabela 11 – Custo anual dos combustíveis fixando a quantidade consumida

	Preço (R\$/ton)	Quantidade (ton/ano)	Custo (R\$/ano)
Carvão mineral	241,25	287208	69288930,00
Carvão vegetal	470,00	329000	154630000,00

Considerando os custos com combustíveis como fluxos iguais para todos os anos e desprezando o aumento do preço dos mesmos e os custos com manutenção, é possível obter o fluxo de caixa anual, a partir das entradas, que representam os ganhos econômicos referentes

¹⁹ Informação fornecida por responsáveis do Setor de Suprimentos da empresa USIMINAS, em Belo Horizonte, em junho de 2013.

ao uso do novo energético e as saídas, que indicam novos gastos decorrentes da troca do insumo. Tem-se portanto:

Tabela 12 – Fluxo de caixa para o investimento em carvão vegetal por ano

Entrada do caixa	R\$ 69.288.930,00
Saída do caixa	R\$154.630.000,00
Fluxo de caixa	R\$ 85.341.070,00

Os custos com o investimento inicial não foram fornecidos pelas empresas consultadas e não foram encontrados em referências atuais, dessa forma, foi indicado como uma variável nos cálculos (*I*). O valor residual da venda dos altos-fornos a coque de carvão mineral foi indicado por R_{COQ} . O valor residual da venda dos altos-fornos a carvão vegetal no final de sua vida útil foi representada por R_{VEG} .

Sendo a vida útil do alto-forno de 15 anos, o horizonte de tempo do fluxo de caixa é 15 anos. A Tabela a seguir apresenta os componentes do fluxo de caixa anual para os 15 anos considerados.

Tabela 13 – Fluxo de caixa para o investimento com horizonte de tempo de 15 anos

Fluxo do ano 0	Fluxo do ano 1	Fluxo do ano 2	...	Fluxo do ano 15
-R\$ 85.341.070,00- <i>I</i> + R_{COQ}	- R\$ 85.341.070,00	- R\$ 85.341.070,00	- R\$ 85.341.070,00	- R\$ 85.341.070,00 + R_{VEG}

Substituindo os valores da Tabela 13, com o investimento, na fórmula do valor presente de uma série uniforme antecipada, tem-se:

$$VP = -85.341.070 \frac{(1 + 0,1)^{15} - 1}{(1 + 0,1)^{14} \cdot 0,1} - I + R_{COQ} + \frac{R_{VEG}}{(1 + 0,1)^{15}}$$

$$VP = -714.022.060,00 - I + R_{COQ} + \frac{R_{VEG}}{4,2}$$

O valor presente baseado nos custos dos combustíveis utilizados foi negativo, resultando em cerca de R\$ 714 milhões de gasto com a substituição dos energéticos. Para amenizar os altos custos com esse investimento, os valores residuais das vendas dos equipamentos teriam que ser muito altos. Como essa hipótese é improvável, tem-se que, para o caso de uma indústria de dois altos-fornos com as capacidades indicadas na Tabela 11, o investimento com o novo combustível não é atrativo economicamente.

4.2 INDÚSTRIA QUÍMICA

4.2.1 As emissões de CO₂ da indústria química

Os consumos de energéticos utilizados foram os fornecidos pelo BEN (2011), os quais possibilitaram a quantificação das emissões atmosféricas de CO₂ do setor industrial químico, no ano de 2010. Os combustíveis analisados foram aqueles com maior participação no consumo do setor. Como disposto na Tabela 5, os energéticos mais consumidos são: gás natural, óleo combustível e outros secundários do petróleo. Outros combustíveis, como o carvão vapor e a lenha, não serão considerados nos cálculos, pois representam menos de 2% do consumo total do setor. As emissões por eletricidade não foram consideradas nas quantificações, pois dependem da forma de geração de energia.

Todo combustível utilizado no setor de produtos químicos foi considerado de uso energético, em que o carbono estocado é nulo. Foi utilizada a fração de carbono oxidada de 95%, obtida a partir do BEESP (2010).

As etapas necessárias para obtenção do resultado final foram dispostas nas Tabelas 13 e 14, como representadas a seguir.

Tabela 14– Etapas I, II e III da metodologia de quantificação das emissões de CO₂ para a indústria química

	Etapa I		Etapa II		Etapa III	
Combustível	Consumo (tep)	Fator de conversão (TJ/tep)	Consumo (TJ)	Fator de emissão de carbono (tC/TJ)	Conteúdo de carbono (t C)	Conteúdo de carbono (Gg C)
Gás Natural	2289000	0,041	93152	15,3	1425219	1425,219
Óleo Combustível	233000	0,043	10009	21,1	211185	211,185
Outras Sec. Petróleo	2391000	0,043	102708	19,0	1951455	1951,455

Tabela 15– Etapas IV, V e VI da metodologia de quantificação das emissões de CO₂ para a indústria química

	Etapa IV		Etapa V		Etapa VI	
Combustível	Carbono estocado (Gg C)	Emissão líquida de carbono (Gg C)	Fração oxidada	Emissão de carbono (Gg C)	Emissão de CO ₂ (Mt CO ₂)	Emissão de CO ₂ (%)
Gás Natural	-	1425,219	0,95	1353,958	4,965	40
Óleo Combustível	-	211,185	0,95	200,626	0,736	6
Outras Sec. Petróleo	-	1951,455	0,95	1853,882	6,798	54

Reitera-se que os valores são calculados em escala anual e é considerado todo o território brasileiro.

Assim sendo, foi possível elaborar o Gráfico 9, que apresenta a participação de cada combustível nas emissões de CO₂ da indústria química, em 2010.

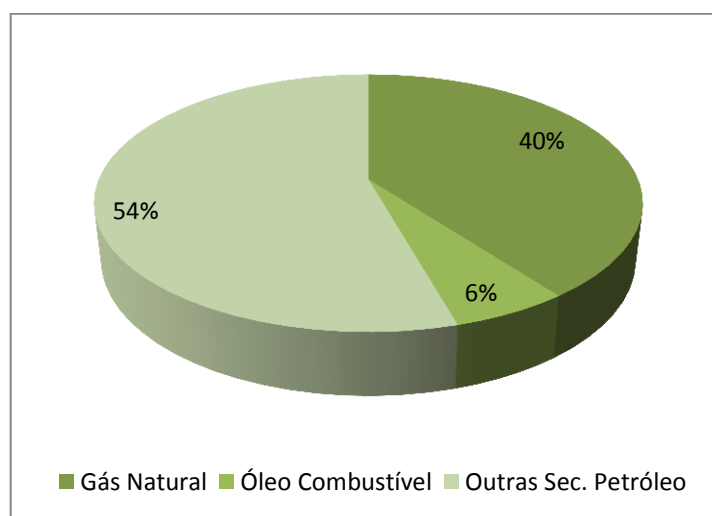


Gráfico 9 – Emissões de CO₂ por combustível na indústria química

Dos combustíveis mais utilizados no setor industrial químico, as outras fontes secundárias do petróleo foram as maiores responsáveis pelas emissões atmosféricas de CO₂ da atividade industrial. O combustível emitiu 6,8Mt de CO₂, correspondendo a 54% do total das emissões. O gás natural contribui com 40% (5,0Mt CO₂) das emissões nacionais do setor em estudo, seguido do óleo combustível, com 6% (0,7Mt CO₂).

A emissão total de CO₂, somadas as quantidades emitidas dos principais combustíveis utilizados, foi de 12,5Mt.

Observa-se que os combustíveis derivados do petróleo predominam a matriz energética da indústria química e que as outras fontes secundárias do petróleo, entre elas a gasolina, a nafta, a querosene e o gás de refinaria, são os maiores responsáveis pelas emissões atmosféricas de dióxido de carbono.

Assim como as outras fontes secundárias do petróleo, o gás natural é amplamente utilizado na indústria química, sendo responsável por grande parte das emissões de CO₂. Embora não seja um energético renovável, o uso do gás natural vem sendo incentivado, devido às vantagens econômicas e de produtividade encontradas, além da redução dos impactos ambientais relacionados à emissões de poluentes gasosos.

Para efeito de comparação e melhor compreensão da metodologia *top-down* do IPCC, procedeu-se com as quantificações, realizando-se suposições do consumo de energia por fonte.

4.2.2 Uso de um combustível para suprir toda a demanda energética

Assim como foi feito para a indústria de ferro-gusa e aço, será suposto que todo o consumo energético da indústria brasileira de produtos químicos seja abastecido por apenas um combustível. De acordo com BEN (2011), o consumo total para o ano de 2010 foi de $7443 \times 10^3 \text{ tep}$ (não incluso o consumo de eletricidade). Fixando este consumo para cada combustível utilizado na indústria (etapa 1 da metodologia), é possível estimar quanto se emitiria se matriz energética fosse substituída por este combustível. A Tabela 13, a seguir, mostra o resultado obtido das emissões de CO_2 de cada combustível, como se este fosse utilizado como suprimento para toda demanda energética do setor.

Tabela 13 – Emissões de CO_2 considerando consumo total do setor por apenas um combustível.

Combustível	Emissão de CO_2 (Mt CO_2)
Gás Natural	26,5
Óleo Combustível	38,6
Outras Sec. Petróleo	34,8

Nota-se que os combustíveis que mais emitem gás carbônico, para o mesmo consumo de energia são, respectivamente, o óleo combustível, outras fontes secundárias do petróleo e o gás natural. Analisando somente as emissões de CO_2 , percebe-se que, dentre os combustíveis analisados, o gás natural se mostra menos poluente. Isso ocorre devido os valores inferiores do fator de conversão e do fator de emissão de carbono desse combustível, já mencionados anteriormente.

A partir da quantidade de CO_2 emitida pelos combustíveis, supondo que os mesmos sejam utilizados na indústria de produtos químicos de forma exclusiva, e do consumo total real do setor, com sua matriz energética diversificada, elaborou-se o Gráfico 10 a seguir.

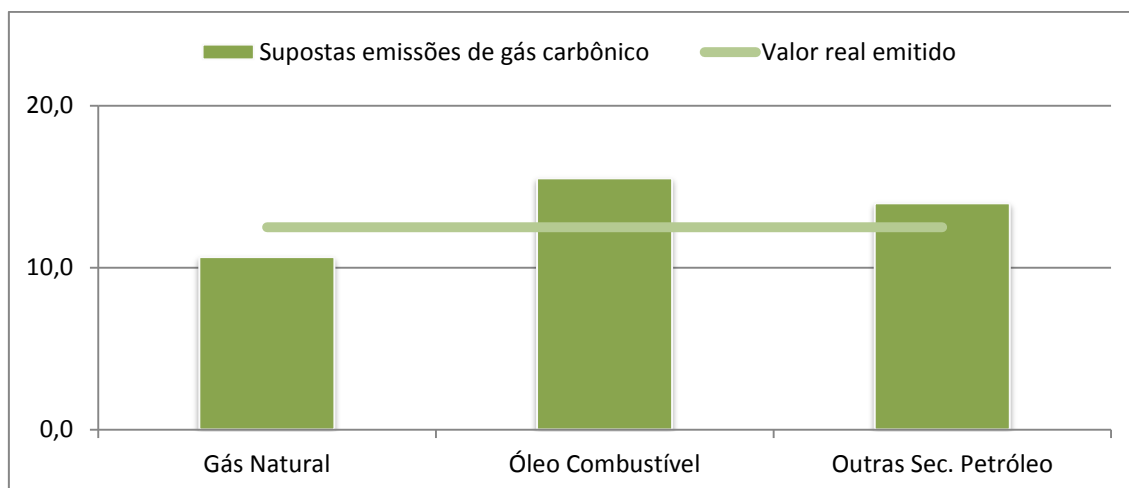


Gráfico 10– Emissões de CO₂ supondo o consumo de apenas um combustível (em Mt de CO₂)²⁰

Observa-se que, se fosse possível utilizar apenas um combustível na indústria química para suprir sua demanda energética, as emissões de CO₂ seriam menores para o gás natural.

O óleo combustível, por sua vez, apresentou a maior emissão de gás carbônico entre os principais combustíveis utilizados na indústria. As supostas emissões do uso exclusivo de outras fontes secundárias do petróleo, assim como o óleo combustível, apresentaram emissões superiores ao valor real emitido. Dessa forma, observa-se que o gás natural é um potencial substituto para o óleo combustível, com redução do impacto ambiental ocasionado pelas emissões de CO₂.

Observa-se que as vantagens econômicas e ambientais do gás natural em relação aos outros combustíveis fósseis vêm sendo exploradas pelo setor industrial. Segundo Rezende (2007), a indústria química de carbonato de cálcio, Quimvale, em Barra do Piraí, decidiu substituir o óleo combustível por gás natural, a fim de reduzir a emissão de CO₂.

Nota-se que, dentre as três principais fontes de energia utilizadas nesse processo industrial, nenhuma delas é renovável. Dessa forma, sugere-se que se amplie a participação dos combustíveis renováveis no processo e que haja maiores investimentos em pesquisa e desenvolvimento para viabilizar o uso de um energético alternativo.

²⁰O consumo de energia por eletricidade não foi computado nessa estimativa.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos foi possível determinar as emissões de CO₂ dos principais combustíveis utilizados no setor industrial químico e de ferro-gusa e aço, no ano de 2010. Tais dados forneceram base para a seleção dos combustíveis que mais contribuíram para a elevação do efeito estufa. A partir de hipóteses realizadas, obtiveram-se resultados das emissões da utilização de um único combustível para suprir toda a demanda energética das indústrias. Dessa forma, foi possível realizar um comparativo entre cada um.

As emissões de CO₂ para o carvão vegetal foram determinadas. Entretanto, segundo o MCT (2006b), as estimativas das emissões de CO₂, para o combustível, devem ser incluídas no inventário nacional de emissões do sistema energético, apenas a título de informação, sem serem adicionadas às emissões dos combustíveis fósseis. Assim sendo, as emissões derivadas do consumo do carvão vegetal são objeto do módulo metodológico do IPCC, *Uso do Solo e Manejo Florestal*, onde será determinado o balanço entre o carbono emitido pela biomassa removida e o carbono absorvido durante o crescimento de novas plantas.

A ampliação das áreas plantadas, seja com eucalipto ou variedades nativas, irá sequestrar quantidades adicionais de carbono, reduzindo o efeito estufa e colaborando para a melhoria do microclima de certas regiões, em particular daquelas mais áridas. Estima-se que cada tonelada de madeira de eucalipto sequestre e fixe, aproximadamente, 1,6 tonelada de CO₂ ao longo de seu processo de formação (VITAL; PINTO, 2009). Há, portanto, espaço para que o Brasil se torne um hospedeiro de projetos de MDL, desde que utilize carvão vegetal certificado, proveniente de reflorestamento.

A substituição de um combustível altamente emissor de Gases do Efeito Estufa por outro menos poluente é um dos procedimentos de Produção Mais Limpa, uma vez que propõe a alteração da matéria prima com o objetivo de reduzir os impactos ambientais ocasionados pelo processo industrial. A alteração do combustível com o objetivo de minimizar os impactos ambientais decorrentes da atividade industrial é registrada pela ONU como um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, vinculado ao Protocolo de Quioto. Com essa postura, a empresa pode atrair investidores, se adequar à legislação vigente e se tornar mais competitiva no ramo dos negócios, retornando o investimento financeiro inicial e garantindo a perenidade de suas atividades.

Os três principais combustíveis utilizados na produção de ferro-gusa e aço são o coque de carvão mineral, o carvão vegetal e o carvão mineral. Com o objetivo de minimizar futuros impactos com o aquecimento global e garantir a sustentabilidade da atividade industrial, sugere-se o uso do carvão vegetal, uma vez que se trata de um combustível renovável, do qual o país tem capacidade de produzir para suprir a demanda do setor em longo período de tempo.

Embora ainda seja grande a disponibilidade de grandes jazidas de carvão mineral (CEPA, 1999), a participação do carvão mineral como combustível nas indústrias deve ser reduzida, como um esforço para minimizar as emissões de gás carbônico e prevenir maiores consequências com o aquecimento global. A substituição do carvão mineral reduziria a dependência do Brasil de países importadores do carvão, uma vez que, segundo BEN (2011) o carvão de consumo industrial é totalmente importado.

As usinas siderúrgicas constituem um dos grandes pilares da indústria brasileira, com forte presença tanto no mercado interno quanto nas exportações do país. O uso de carvão vegetal nesse setor industrial, como combustível alternativo ao coque de carvão mineral, auxiliaria na mitigação das emissões de GEE e, segundo a EMBRAPA (2011), seria responsável pela produção do “aço verde”, designado dessa forma devido a fonte de energia renovável utilizada. Além disso, a redução do minério de ferro por carvão vegetal confere maior qualidade ao aço, uma vez que reduz o teor de impurezas no produto final.

Na indústria química brasileira, os combustíveis mais consumidos em 2010 foram as fontes secundárias do petróleo, o gás natural e o óleo combustível, respectivamente. Observou-se que o maior emissor são as outras fontes secundárias do petróleo, sendo que o óleo combustível é o energético que emite mais CO₂ por unidade de combustível consumido.

Para redução das emissões de CO₂ na indústria química é indicado que se priorize o uso do gás natural, ao invés dos outros dois energéticos citados. Os baixos teores de contaminantes gasosos, a segurança operacional, o maior tempo de vida útil proporcionado aos equipamentos e a redução de custos são outros fatores que contribuem para a adoção do gás natural no setor industrial.

Ao adotar o gás natural deve-se atentar, no entanto, que o número de fornecedores nacionais é restrito, podendo acarretar elevados custos logísticos, falta de assistência técnica especializada e altas taxas de importação.

Tanto na indústria química, quanto na indústria siderúrgica, pode-se utilizar o bagaço de cana-de-açúcar como substituto dos derivados de petróleo e lenha. Tal atitude reduz os impactos ambientais relacionados à estocagem de bagaço de cana nas usinas sucroalcooleiras e contribui para a redução das emissões de GEE, uma vez que o bagaço é uma fonte de energia renovável. Outras vantagens da utilização do bagaço são a geração de empregos temporários e a autonomia do país, que não necessitaria importar o combustível para suprir sua demanda energética.

A produção de cana-de-açúcar, entretanto, pode ser potencialmente prejudicial ao meio ambiente se não for feita de acordo com a legislação vigente e com práticas de produção sustentáveis.

Observou-se que o carvão vegetal, com sua característica de renovável, é potencial substituto aos combustíveis fósseis, entre eles os e derivados do carvão mineral, para minimizar o aquecimento global. Contudo, o carvão vegetal não precisa ser necessariamente produzido a partir da lenha. Podem ser utilizados resíduos agroindustriais e florestais para sua geração, o que promoveria a reutilização de um resíduo, reduzindo os impactos de sua disposição e trazendo redução de custos com a compra de matéria-prima.

Com relação às emissões de CO₂ na cadeia produtiva dos energéticos em estudo, salienta-se que todos eles impactam o meio ambiente em seu processo produtivo, emitindo GEE. Para realizar a viabilidade ambiental de um desses combustíveis, deve-se analisar todo o seu ciclo de vida e as etapas em que os GEE são emitidos na atmosfera.

Ressalta-se que, a substituição de um combustível em processos industriais pode exigir adaptações nos equipamentos e procedimentos, para manter a produtividade, qualidade e custo do produto final. Dessa forma, como discorre Pinheiro (2004), a viabilidade técnica e econômica deve sempre ser considerada, acompanhada de treinamento aos operários.

As emissões de CO₂ pela combustão do carvão vegetal podem ser consideradas nulas devido ao caráter renovável do energético. Entretanto, a contribuição para o aquecimento global devido a combustão do carvão vegetal não é nula, pois outros GEEs que são emitidos pela queima do carvão não são absorvidos pela biomassa durante o desenvolvimento da planta.

A análise de investimento pelo método do Valor Presente mostrou que os custos para a utilização do carvão vegetal como insumo para a redução de minério de ferro em altos- fornos

são muito altos se comparados ao uso do coque de carvão mineral. Entretanto, algumas considerações podem ser feitas com relação ao alto custo obtido para o VP:

- Se forem incluídos os custos com o processo de carbonização do carvão mineral e as taxas envolvidas com a importação do carvão mineral, a diferença de preço seria menor, tornando o investimento mais atrativo.
- O uso de créditos de carbono como projeto de MDL também poderia contribuir para a atratividade do investimento, pois as reduções nas emissões de CO₂ poderiam ser vendidas no mercado de carbono.
- Com a utilização do carvão vegetal, o teor de impurezas no gusa líquido e no aço fundido são reduzidas. Dessa forma, se diminuiriam os gastos com o refino dos mesmos.

A análise de investimento teve como objetivo servir como ferramenta de avaliação do custo-benefício da troca de combustíveis para o alto-forno. Entretanto, outros fatores como a perda de qualidade ambiental e os futuros problemas sociais das emissões atmosféricas não são considerados nessa análise. Muitos desses fatores ainda não possuem conhecimento difundido para sua valoração e a devida quantificação em termos financeiros. Isso nos traz um alto grau de incerteza das consequências futuras da atividade siderúrgica, que pode resultar em situações de irreversibilidade dos impactos socioambientais causados pelas elevadas emissões de GEE.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Na indústria química, os combustíveis derivados de petróleo predominam como fonte energética, sendo a categoria “outras fontes de petróleo” a mais utilizada e responsável por 54% das emissões de CO₂ (6,8 Mt CO₂) seguida do gás natural e do óleo combustível, com 40% (5,0 Mt CO₂) e 6% (0,7Mt CO₂), respectivamente. Nesse caso, o uso do gás natural pode ser incentivado, pois apresenta vantagens ambientais, técnicas e econômicas em relação aos derivados de petróleo utilizados pelo setor industrial.

Observou-se que, em 2010, o uso do coque de carvão mineral e do carvão mineral foi responsável por 61% das emissões nacionais de CO₂ do setor de ferro-gusa e aço, o que equivale a 35,8 Mt CO₂. O carvão vegetal contribuiu com 25% (15,1 Mt CO₂) das emissões nacionais.

Supondo que o carvão vegetal fosse o único energético utilizado na indústria de ferro-gusa e aço em 2010, ele seria o maior emissor de gás carbônico, em comparação com os outros combustíveis. Isso se deve, principalmente, ao fator de emissão de carbono, cujo carvão vegetal possui o maior valor entre os combustíveis estudados. Contudo, a compensação das emissões de CO₂ pelo carvão vegetal, devido à captura de gás carbônico durante o processo de respiração das florestas, não é considerada na metodologia *top-down* do IPCC. Para tanto, o módulo metodológico *Uso do Solo e Manejo Florestal* deve ser utilizado.

Os resultados obtidos pela análise de investimento não favoreceu a substituição do coque de carvão mineral por carvão vegetal, devido os altos custos envolvidos. Entretanto, uma análise mais abrangente, considerando todo o processo de produção dos combustíveis e os incentivos econômicos envolvidos, pode fornecer maior atratividade financeira para o uso do carvão vegetal na indústria brasileira.

As informações obtidas com relação às emissões de gás carbônico das indústrias em estudo são essenciais para a composição de um inventário de emissões de gases do efeito estufa, que é uma ferramenta importante na análise estratégica da viabilidade econômica, técnica e ambiental da utilização de combustíveis no setor industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO (ASPE). **Fontes de Energia Secundária**. 2011. Disponível em: <<http://www.aspe.es.gov.br/crea-es/1/1244.htm>> Acesso em: 22 nov. 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Carvão Mineral**. 2004. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao(2).pdf)> Acesso em: 28 dez. 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Fontes não renováveis: Carvão Mineral**. 2009. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap9.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2013.

ANDRADE, J.M.F; DINIZ, K.M. **Impactos Ambientais da Agroindústria da Cana-de-açúcar: Subsídios para a Gestão**. 2007. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia**. São Paulo: Editora Arte & Ciência, Volume 2, 1997.

ASBAHR, P. (2006) **A Responsabilidade Socioambiental da Indústria Química**. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA (ABQUIM). **A Indústria Química Brasileira**. São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.abiquim.org.br/conteudo.asp?princ=ain>> Acesso em: 10 dez. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA (ABQUIM). **O Desempenho da indústria química brasileira em 2011**. São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.abiquim.org.br/enaiq2011/apr/livrete_dados_2011_PDF.pdf> Acesso em: 10 dez. 2011.

BALANÇO ENERGÉTICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (BEESP) 2010: Ano base 2009. São Paulo, 2010. Disponível em: <http://www.energia.sp.gov.br/Balan%C3%A7o_2010_2009.pdf> Acesso em: 25 maio 2011.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2010: Ano base 2009. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf> Acesso em: 08 maio 2011.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2011: Ano base 2010. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf> Acesso em: 15 nov. 2011.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2012: Ano base 2011. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf> Acesso em: 15 maio 2013.

BAOBAB Resources, 2013. **Developing mineral resources in Mozambique.** Disponível em:<<http://baobab-resources.abn-ir.net/cs/>> Acesso em: 01 jul. 2013.

BARROS, A. S. **Óleos Combustíveis.** 2004. Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/liquidos/oleocomb/>>. Acesso em: 26 dez. 2011.

BIODIESELBR.**Carvão Vegetal - biomassa.** Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/energia/biomassa/carvao-vegetal.htm>> Acesso em: 13 maio 2011.

BIODIESELBR. **Créditos de Carbono – MDL.** Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/credito-de-carbono/mdl/index.htm>> Acesso em: 31 maio 2011.

BIZZU, W. A. **Geração, Distribuição e Utilização de Vapor.** 2005. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP2.pdf>> Acesso em: 13 out. 2011.

BOAS, E. A. (1966). **A indústria siderúrgica na América Latina:** sua origem e evolução. São Paulo: Panambra Industrial e Técnica S.A., 1966.

BORBA, R. F. **Carvão Mineral:** Balanço Mineral Brasileiro. 2001. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/carvao.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2011.

BRAGA, B. Hespagnol, I.; Conejo, J. G.; Barros, M. T. L.; Veras Junior, M. S; Porto, M. F. A.; Nucci, N. L. R.; Juliano, N. M. A.; Eiger, S. **Introdução à Engenharia Ambiental.** São Paulo: Prentice Hall, 2002.

CARDOSO, F. (2006). **Efeito Estufa: Por que a Terra morre de calor.** 1. Ed. – São Paulo: Editora Terceiro Nome; Mostarda Editora, 2006.

CASTRO, H. R. **Entenda o que é o IPCC e suas conclusões**. 2007. Disponível em: <<http://hrcastro.wordpress.com/2007/11/16/entenda-o-que-e-o-ipcc-e-suas-conclusoes/>>. Acesso em: 20 mar. 2011.

CENTRO DE ENSINO E PESQUISA APLICADA (CEPA). **Energia a Essência dos Fenômenos**. 1999. Disponível em: <<http://cepa.if.usp.br/energia/>>. Acesso em: 26dez. 2011.

CENTRO DE ENSINO E PESQUISA APLICADA (CEPA). **Fontes de Energia no Brasil**. 2001. Disponível em: <<http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo1B/>>. Acesso em: 30 dez. 2011.

CESAR, P. **Portal de estudos em química: Ciclo do Carbono**. 2007. Disponível em: <http://www.profpc.com.br/ciclo_carbono.htm>. Acesso em: 07 fev. 2011.

COMITRE, V.; DO CARMO, M. S. (2010) **Produção de Energia Elétrica a Partir do Bagaço de Cana-de-açúcar: Cenários de Substituição na Indústria de Alimentos e Bebidas do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2010.

COMPANHIA DE GÁS DE SÃO PAULO (COMGAS). **Gás Natural na Indústria**. 2005. Disponível em: <http://www.comgas.com.br/sou_industrial/gasnatural/segmentos.asp>. Acesso em: 07 dez. 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **A Geração Termoeleétrica com a Queima do Bagaço de Cana-de-Açúcar no Brasil: Análise do Desempenho da Safra 2009-2010**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_05_05_15_45_40_geracao_termo_baixa_res..pdf>. Acesso em: 09 dez. 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 001, de 23/01/86**. Licenciamento Ambiental, Normas e Procedimentos, 1986.

CUNHA, K. B. (2005). **Mecanismo de desenvolvimento limpo: evolução do instrumento e suas perspectivas**. Dissertação (mestrado), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM), 2012. **Sumário Mineral** / Coordenadores Thiers Muniz Lima, Carlos Augusto Ramos Neves Brasília: DNPM, Brasília, 2012.

ECODESENVOLVIMENTO. **Conferência das Partes sobre o Clima (COP16)**. Disponível em <<http://www.ecodesenvolvimento.org.br/noticias/cop16>>. Acesso em: 07 maio 2011.

ESTADÃO. **COP - 18 - Protocolo de Kyoto adiado até 2020**. 2013. Disponível em: <<http://www.oestadoce.com.br/noticia/cop-18-protocolo-de-kyoto-adiado-ate-2020>> Acesso em: 30 set. 2013.

FERREIRA, O. C. **Emissão de Gases de Efeito Estufa na Produção e Consumo do Carvão Vegetal**. São Paulo, Economia & Energia, 2000.

FIQUEIRA, A. Horizontalização decisória nas arenas políticas setoriais. **Revista de Economia e Relações Internacionais**. São Paulo: Faculdade de Economia da Fundação Armando Alvares Penteado. Vol. 9, n. 18 . 2011

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS – CETEC. **Produção e Utilização de Carvão Vegetal**. Minas Gerais, Publicação Técnica n. 8 - CETEC – 1982.

GAUDARD, D. M. **Convenção-Quadro sobre mudanças do Clima (UNFCCC)**, 2006. Disponível em: <<http://www.cmqv.org/website/artigo.asp?cod=1461&idi=1&id=14257>> Acesso em: 24 mar. 2011.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, Ambiente & Desenvolvimento**. 3. ed. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008.

GOUVEIA, M. **O que é lingote de ferro**. 2012. Disponível em <<http://www.mecanicaindustrial.com.br/conteudo/644-o-que-e-lingote-de-ferro>> Acesso em: 10 jul. 2013.

GOVERNO FEDERAL, 2008. **Contribuição do Brasil para evitar a mudança do clima**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/geesp/docs/livros_revistas/contribuicao_brasil_evitar_mudanca_clima.pdf> Acesso em: 04 jul. 2013.

INFOPÉDIA. **Produção do aço**. Porto: Porto Editora. 2013. Disponível em: <[http://www.infopedia.pt/\\$producao-do-aco](http://www.infopedia.pt/$producao-do-aco)> Acesso em: 02Jun. 2013.

INSTITUTO DE PESQUIS AMBIENTAL DA AMAZÔNIA (IPAM). **Difusão nos oceanos**. 2013. Disponível em: <<http://www.ipam.org.br/saiba-mais/glossariotermino/Difusao-nos-Oceanos-/26>> Acesso em: 10 jul. 2013.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB), **O aço. Processo siderúrgico**. 2013a. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo--etapas.asp>> Acesso em: 02 maio 2013.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). **Número de mercado, Estatísticas**. 2011. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp>> Acesso em: 18 abr. 2011.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). **Relatório de sustentabilidade**. 2013b. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/relatorio.asp>> Acesso em: 04 jul. 2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2001) **The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability**. In: REPORT of working group II of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, 2001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual**. 1996. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.html>> Acesso em: 09 abr. 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007**. 2007. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/spm.html> Acesso em: 29 jan. 2011.

ITAMARATY. **Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP-16)**. Disponível em: <<http://www.itamaraty.gov.br/sala-de-imprensa/notas-a-imprensa/>> Acesso em: 10 maio 2011.

JACOMINO, V. M. F.; CASTRO, L.F.A.; RIBEIRO, E.D.L.; LEÃO, M.M.D.; SOUZA, C.M.; GOMES, A.M.; ALMEIDA, M.L.B.; LOPES, L.E.F. **Controle ambiental das indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002.

LADGRAF, F. J. G.; TSCHIPTSCHIN, A. P.; GOLDENSTEIN, H. **Notas sobre a história da metalurgia no Brasil**. Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/notas/notas.htm>> Acesso em: 09 maio 2011.

LIMA, M. S. O. 2011. **A aplicabilidade do gás natural do ponto de vista mercadológico, econômico e ambiental: um estudo para os Estados do Amazonas e de São Paulo.** 2011. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

LIMA, M. S. O. **O Gás Natural como Alternativa Energética para a Indústria Têxtil: Vantagem Competitiva ou Estratégia de Sobrevivência?** 2007. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MARCOVITCH, J. (2008). **Mitigação de gases de efeito estufa: a experiência setorial e regional no Brasil.** Universidade de São Paulo, 2008.

MARTENS, P.; ROTMANS, J. (1999). **Climatechange: an integrated perspective.** Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda, 1999.

MATARELLI, F. A.; LOPES, L. E. F.; CASTRO, L. F. A. **Siderurgia a carvão vegetal.** In: BIOMASSA: Energia nos Trópicos em Minas Gerais. Minas Gerais, 2001.

MILLER, G. T. **Living in the Environment.** Califórnia, Wadsworth Pub. Inc., 1985.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Emissões de dióxido de carbono por queima de combustíveis: abordagem top-down.** 2006a. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/17349.html>>. Acesso em: 14 jul. 2011.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Emissões de gases do efeito estufa nos processos industriais e por uso de solventes.** 2006b. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0008/8733.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2011.

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

OLIVEIRA, J. G. **Perspectivas para a cogeração com bagaço de cana-de-açúcar: potencial do mercado de carbono para o setor sucroalcooleiro paulista.** Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

OZORIO L. M., BASTIAN-PINTO C. L., BAYDIA T. N., 2010. Análise de projetos no setor siderúrgico pela teoria de opções reais. In: **X Encontro Brasileiro de Finanças.** São Paulo, 2010.

PAGLIUSO, J. D. **Combustíveis e combustão**. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1984.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). **Organization**, 2011. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>>. Acesso em: 20 mar. 2011.

PETROBRAS. **Para o seu negócio Industrial**. 2011. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos/para-o-seu-negocio/industrial/>>. Acesso em: 20 dez. 2011.

PINHEIRO, P. C. C. **Sistemas Térmicos**, 2004. Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/ema003.htm>>. Acesso em: 26 dez. 2011.

QUADRILÁTERO Ferrífero. Disponibiliza informações sobre o Quadrilátero Ferífero de Minas Gerais. 2011. Disponível em: <<http://www.asminasgerais.com.br/?item=ALBUM&codAlbum=119>> Acesso em: 29 abr. 2011.

REBELATTO, D. (Org.), 2004. **Projeto de Investimento: um estudo de caso completo na área de serviços**. Barueri: Manole.

REZENDE, S. **Indústria química troca óleo por gás natural**, 2007. Disponível em: <<http://www.sidneyrezende.com/noticia/4981+industria+quimica+troca+oleo+por+gas+natural+>>>. Acesso em: 07 set. 2011.

ROCHA, J. D. **O carvão vegetal no Brasil e a produção de aço verde**. 2011. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2011/o-carvao-vegetal-no-brasil-e-a-producao-de-aco-verde>>. Acesso em: 07 dez. 2011.

ROCHA, M. T.; MELLO, P. C. O efeito estufa e o mecanismo de desenvolvimento limpo. In: **A questão ambiental: desenvolvimento e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Escola Nacional de Seguros, 2004.

ROMEIRO, S. B. B. **Química na Siderurgia**. Porto Alegre: Área de Educação Química do Instituto de Química da UFRGS, 1997.

SALIERNO, G. F. **Sistema de monitoramento do desempenho dos fornos a carvão vegetal**. Universidade Federal De Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2007.

SANTOS, S. **Impacto Ambiental Causado pela Indústria Têxtil**. Engenharia de Produção e Sistemas, UFSC, Santa Catarina, 2002.

SCANDIFFIO, M.I.G. (2001). **A competitividade do gás natural no segmentos de revestimento cerâmico brasileiro**. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

SEFAZ. **Consultas on-line – valor real pesquisado**. 2013. Disponível em: <<http://www1.sefaz.ms.gov.br/Pauta/>> Acesso em: 20 jun. 2013.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE). **O Pacto Nacional da Indústria Química**, 2009. Disponível em: <http://www.sebrae.com.br/setor/quimica-e-plasticos/o-setor/industria-quimica-e-plasticos/integra_bia/ident_unico/12185>. Acesso em: 14 dez. 2011.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (SENAI). **Etapas de Fabricação do aço e Ferro Fundido**. São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAkz4AD/etapas-fabricacao-ferro-fundido>>. Acesso em: 09jun. 2013.

SIMÕES, A. F. **O Transporte Aéreo Brasileiro no Contexto de Mudanças Climáticas Globais: Emissões de CO₂ e Alternativas de Mitigação**. Rio de Janeiro, 2003.

SUGUIO K. **Mudanças Ambientais da Terra**. São Paulo: Instituto Geológico, 2008. 336 p.

THOMAZ, E. C. S. **Escória de alto-forno**. São Paulo, 2010. Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/escoria_fabricacao.pdf> Acesso em: 09 jun. 2013.

UNEP RISO CENTER (URC). **Mecanismo de Desarrollo Limpio**: introducciónal MDL. UnepRiso Centre, Riso National Laboratory, Roskilde, 2003.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Registered CDM projects**, 2006. Disponível em: <<http://unfccc.int/cdm>>. Acesso em: 30 abr. 2011.

UOL. **Conferência em Cancún termina com acordo modesto**. 2011. Disponível em: <<http://jcrs.uol.com.br/site/noticia.php?codn=49149>> Acesso em: 13 maio 2011.

VALLOUREC & MANNESMANN TUBES (V&M). **Mecanismo de desenvolvimento limpo formulário do documento de concepção do projeto.** 2006. Disponível em <<http://www.vmtubes.com.br/>> Acesso em: 03 jul. 2013.

VALLOUREC & MANNESMANN TUBES (V&M). **Relatório de Sustentabilidade 2011.** 2011. Disponível em: <<http://www.vmtubes.com.br/>> Acesso em 29jun. 2013.

VITAL M. H. F.; PINTO M. A. C. (2009). **Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil.** Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), 2009.