

**revista brasileira de**  
**ENERGIA**



Sociedade Brasileira de  
Planejamento Energético

**Criação de capa e Diagramação**

Alessandro Rodrigo Pereira Dias

**Revisão**

Kelly Fernanda dos Reis

**Revista Brasileira de Energia  
Vol. 21 - nº 1**

Itajubá, 2015 - SBPE

Editor: Edson da Costa Bortoni  
121 p.

1 - Energia - artigos

2 - Publicação científica

ISSN: 0104303-X

É permitida a reprodução parcial ou total da obra, desde que  
citada a fonte

A Revista Brasileira de Energia tem como missão:

“divulgar trabalhos acadêmicos, estudos técnicos e resultados de pesquisas relacionadas ao planejamento energético do país e das suas relações regionais e internacionais.”

**Editor Responsável**

Edson da Costa Bortoni

**Comitê Editorial**

Alexandre Salem Szklo

Amaro Pereira

Annemarlen Gehrke Castagna

Clodomiro Unsihuay-Vila

Edmar Luiz Fagundes de Almeida

Edmilson Moutinho dos Santos

Edson da Costa Bortoni

Eduardo Mirko V. Turdera

Elizabeth Cartaxo

Gisele Ferreira Tiryaki

Ivo Leandro Dorileo

Jamil Haddad

Luiz Augusto Horta Nogueira

Oswaldo Soliano

Paulo Henrique de Mello Sant' Ana

Roberto Cesar Betini

Sergio Valdir Bajay

Thulio Cícero Guimarães Pereira

Virginia Parente

Yanko Marcius de A. Xavier

A Revista Brasileira de Energia (RBE) é uma publicação da Sociedade Brasileira de Planejamento Energético (SBPE), editada semestralmente.

**Diretoria da SBPE**

Presidente: Jamil Haddad

Vice-Presidente: Célio Bermann

Diretora de Eventos: Annemarlen Gehrke Castagna

Diretor de Publicações: Arnaldo César da Silva Walter

Diretor Administrativo: Ivo Leandro Dorileo

**Conselho Fiscal**

Roberto Akira Yamachita

Edson da Costa Bortoni

Luiz Augusto Horta Nogueira

**Conselho Consultivo**

Afonso Henriques Moreira Santos

Edmilson Moutinho dos Santos

Ivan Marques de Toledo Camargo

José Roberto Moreira

Luiz Pinguelli Rosa

Maurício Tiommo Tolmasquim

Oswaldo Lívio Soliano Pereira

**Secretaria Executiva da SBPE**

Lúcia Garrido e Kelly Reis

Endereço

Av. BPS, 1303 – Pinheirinho

Itajubá – MG – CEP:37.500-903

E-mail: [exec@sbpe.org.br](mailto:exec@sbpe.org.br)

Os artigos podem ser enviados através do site da SBPE

[www.new.sbpe.org.br](http://www.new.sbpe.org.br)

# SUMÁRIO

AValiação de Estratégias para Reduzir a Emissão de CO<sub>2</sub> por Meio da Alteração da Matriz Energética do Setor de Cimento.....7

Flávia C. Camioto, Daisy A. N. Rebelatto

Análise Energética do Projeto de um Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico com Armazenamento de Energia Elétrica através do Hidrogênio e Banco de Baterias.....35

Maiana Brito de Matos, Ennio Peres da Silva, Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella.

Análise dos Níveis de Emissões de CO<sub>2</sub> do Parque Gerador Termelétrico do Sistema Elétrico Isolado da Cidade de Manaus (AM) no Período de 2006 a 2012.....61

Leonardo Caldas Rocha, Whylker Moreira Frota, Willamy Moreira Frota.

Atividade Econômica e Consumo de Energia Elétrica no Brasil: Uma Abordagem Baseada na Pesquisa Industrial Anual do IBGE.....71

João Felipe Cury Marinho Mathias, Nivalde José de Castro, Silvio Sales de Oliveira Silva, Roberto Brandão.

Estudo das Aplicações do Bagaço da Cana-de-Açúcar dentro e fora das Indústrias SUCROALCOOLEIRAS .....91

Ana Carolina de Souza, Fernanda Izaias Fugita , Angélica Helena de Sousa , Daniele Cristina dos Santos Bofo



## **AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS PARA REDUZIR A EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> POR MEIO DA ALTERAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR DE CIMENTO**

Flávia C. Camioto

Daisy A. N. Rebelatto

### **RESUMO**

O objetivo deste artigo é analisar a possibilidade de redução da emissão de CO<sub>2</sub> por meio da alteração da matriz energética do setor industrial de cimento. Para a medição das emissões de CO<sub>2</sub> dos combustíveis utilizados neste setor, foi usado o método Top-Down, proposto pelo IPCC. Além disso, a partir dos dados de consumo energético, foi realizada a quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> supondo mudanças da matriz, para efeito de comparação das emissões. Os resultados deste estudo indicam que se fosse possível utilizar somente um combustível na indústria de cimento, para suprir toda a demanda energética, as emissões de CO<sub>2</sub> seriam menores para o gás natural. Apesar deste estudo indicar que o carvão vegetal é o segundo emissor de CO<sub>2</sub> do setor, ele pode contribuir para a redução do aquecimento global, assim como outras fontes renováveis, mas desde que seja proveniente de mata de reflorestamento destinada para a atividade industrial. Além disso, ressalta-se que outras alternativas podem ser usadas para a mitigação das emissões deste setor, como: eficiência energética, combustíveis derivados de resíduos ou, ainda, captura e armazenagem de carbono.

**Palavras-chave:** Indústria, Gestão Energética, Estratégia, Impactos Ambientais.

### **ABSTRACT**

The objective of this paper is to analyze the possibility of reducing CO<sub>2</sub> emissions by changing the energy matrix of the cement industry. For the measurement of CO<sub>2</sub> emissions for each major fuel used in this sector, the Top-Down method proposed by the IPCC was used. Moreover, according to the data of energy consumption a measurement of CO<sub>2</sub> emissions was made supposing a change of the energy matrix for purposes of comparing the emissions levels. The results of this study indicate that if it were possible to use only a fuel in the cement industry, to supply the entire energy demand, CO<sub>2</sub> emissions would be lower for natural gas. Although this study has shown that charcoal is the second largest emitter of CO<sub>2</sub> in the industry, it can contribute to the reduction of the global warming, as well as other renewables, since this energy is coming from forest reforestation intended for industrial activity. Furthermore, it is noteworthy that other alternatives can be

used to mitigate emissions from this sector, such as energy efficiency, waste-derived fuels, or even capture and storage of carbon.

**Keywords:** Industry, Energy Management, Strategy, Environmental Impacts.

## 1. INTRODUÇÃO

Num período de mudanças climáticas e restrições cada vez maiores a emissões, é importante focar o desenvolvimento das nações na direção de uma economia de baixo carbono. Em 1992, no Rio de Janeiro, foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (UNCED), na qual a relação entre meio ambiente e desenvolvimento e a necessidade imperativa para o desenvolvimento sustentável foi reconhecida.

Os resultados apresentados no último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007) confirmam que as causas do aquecimento global são atribuídas, em grande parte, às atividades humanas, principalmente, àquelas relacionadas à emissão de CO<sub>2</sub>. Da mesma forma, mostrou-se que as queimas de combustíveis fósseis são responsáveis por cerca de 90% das emissões antropogênicas de dióxido de carbono produzidas por ano.

Neste contexto, em junho de 2012, foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, conhecida como Rio+20, na qual compromissos no valor de bilhões de dólares foram feitos nesta conferência para aumentar o acesso à energia limpa; melhorar a eficiência energética; e ampliar o uso de energias renováveis (ONU, 2012).

Silva e Guerra (2009), no entanto, explicam que o uso de combustíveis fósseis tem movido a economia mundial desde a Revolução Industrial, sendo que a energia é um dos componentes essenciais para o desenvolvimento social e econômico de uma nação e o seu suprimento é um pré-requisito fundamental às atividades humanas.

Nesse sentido, as implicações ambientais da produção e do uso dos recursos energéticos têm-se apresentado como um grande desafio aos países desenvolvidos e em desenvolvimento, uma vez que a produção, distribuição, transformação e consumo de energia devem ser orientados de modo a garantir o desenvolvimento, sem ampliar os efeitos negativos à sociedade e ao meio ambiente. Nesse sentido, alguns autores, como Lior (2010), enfatizam que é preciso um sistema político para suportar de forma rápida e efetiva movimentos em direção à energia sustentável.

Segundo Goldemberg e Moreira (2005), a presença do Governo é essencial para: 1) atender a demanda da sociedade por mais e



melhores serviços de energia; 2) estimular a participação de fontes energéticas sustentáveis e duradouras; 3) priorizar o uso eficiente da energia para liberar capital aos setores mais produtivos da economia e preservar o meio ambiente; 4) utilizar o investimento em energia como fonte de geração de empregos e de estímulo à indústria nacional; 5) incorporar à matriz energética insumos importados quando isso resultar em vantagens comerciais e sociais ao país, inclusive através da abertura de exportação de produtos e serviços e, 6) produzir energia de diversas fontes, reduzindo o risco da eventual escassez de algumas delas de forma compatível com as reservas disponíveis no país.

No caso do Brasil, de acordo com Freitas e Kaneko (2011), a atividade econômica, juntamente com a pressão demográfica, são as principais forças que explicam o aumento das emissões. Por outro lado, a redução da intensidade de carbono e a diversificação da matriz energética para fontes mais limpas são os principais fatores que contribuem para mitigação de emissões.

Dessa maneira, a utilização de energias mais limpas pode ser considerada como estratégica ao desenvolvimento da sociedade, por garantir a perenidade dos recursos naturais e por causar menos impactos ao meio ambiente. A substituição da matriz energética torna-se, neste caso, importante para o direcionamento de recursos públicos, na busca do desenvolvimento sustentável.

Paz, Silva e Rosa (2007), que discutiram os conceitos de sustentabilidade e ética na política energética brasileira e suas implicações sociais e ambientais, afirmam que é imprescindível que a dinâmica das atividades econômicas para suprir as necessidades humanas, pondere os fatores naturais limitantes, como condições para a produção, transformação, distribuição e consumo de energia.

Neste sentido, apesar do estudo de Simões e La Rovere (2008), que analisaram o Brasil do ponto de vista da oferta de energia renovável, concluir que a matriz energética do país é, particularmente, limpa, sendo que a oferta interna de energia renovável, do país, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) é de 44,1% (MME 2012), o setor industrial ainda possui muitas das suas atividades dependentes de combustíveis fósseis. Como consequência, esse setor acaba agredindo o meio ambiente por emitir altíssimas concentrações de gases do efeito estufa (GEE), aumentando o aquecimento global, além de contribuir para a extensa extração de combustíveis na forma de petróleo e carvão.

Neste contexto, de acordo com Kolk e Pinkse (2004), questões relacionadas à mudança do clima têm atraído, cada vez mais, a atenção das organizações nas últimas décadas. Estes autores indicam que

as empresas enfrentam um crescimento gradual de desafios, atrelado, necessariamente, ao grau de adoção de combustíveis fósseis em seus produtos e processos produtivos.

No entanto, é importante considerar que todas as formas de geração de energia provocam interferências no meio ambiente. Algumas são mais impactantes e outras menos. Porém, devido aos grandes impactos ambientais causados pelas fontes fósseis de energia, além da perspectiva de esgotamento, em médio prazo, das reservas existentes, cabe analisar as possibilidades de redução de emissões por parte do setor industrial por meio da adoção de fontes de energias mais limpas, principalmente as renováveis.

Ressalta-se que esforços para reduzir emissões de GEE em países desenvolvidos, bem como no Brasil, já mostraram que podem originar ganhos financeiros, e não perdas. Redução das emissões exige a eliminação de desperdícios e o desenvolvimento de novas tecnologias de produção e fontes alternativas de energia (SIMÕES; LA ROVERE, 2008).

Também, deve ser salientado que a redução acima tem uma importante e fundamental força propulsora no mercado internacional de créditos de carbono, no qual o Brasil participa por meio de projetos ligados ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Projetos ligados à menor geração de energia intensiva (no caso do Brasil, especialmente a biomassa, pequenas centrais hidrelétricas e eólicas) são elegíveis para inclusão no MDL (SIMÕES; LA ROVERE, 2008).

Portanto, é importante considerar as políticas tributárias que podem beneficiar empresas que assumem compromissos ambientais. Além disso, Perrels (2008) aponta que em grande medida a questão do desenvolvimento sustentável é a mudança, não apenas nos sistemas de produção, mas, também, nos padrões de consumo. Assim, para se destacarem no competitivo e acirrado mercado globalizado, as empresas devem manter uma boa imagem perante consumidores cada vez mais preocupados com o meio ambiente.

Considerando isso, pesquisadores têm investido uma quantidade considerável de tempo estudando maneiras de melhorar o consumo de energia e formação de poluentes no processo de fabricação de cimento. Esta indústria é um dos principais produtores de gases de efeito estufa antropogênicos, do qual o CO<sub>2</sub> é o mais significativo (MIKULČIĆ et al, 2012). De acordo com o International Energy Agency - IEA e o World Business Council for Sustainable Development - WBCSD (2009), este setor é responsável por cerca de 5% das emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub> no mundo.

Com relação aos recentes trabalhos referentes a este setor,

pode-se citar o de Benhelal et al (2013), por exemplo, discutiram em seu trabalho as estratégias e potencialidades globais para a mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> em fábricas de cimento. Ke et al (2013), por sua vez, compararam várias metodologias para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da produção de cimento, incluindo os três componentes principais de emissões: emissões diretas a partir do processo de calcinação para produção de clínquer, emissões diretas da queima de combustíveis fósseis e as emissões indiretas do consumo de eletricidade. Já MIKULČIĆ et al (2013) em seu trabalho analisou o potencial de reduzir emissões de CO<sub>2</sub> na indústria de cimento da Croácia. Em 2012, MIKULČIĆ et al (2012) buscou demonstrar o potencial de CFD para apoiar o projeto e otimização de calcinadores, cujo uso parece ser essencial na redução das emissões de CO<sub>2</sub> durante a produção de cimento. Vatopoulos e Tzimas (2012) avaliaram a viabilidade de três tecnologias de captura de CO<sub>2</sub> para a indústria de cimento. Vale mencionar ainda o trabalho de Barker et al (2009) que resumiu um estudo que avaliou as tecnologias que poderiam ser utilizadas para a captura de CO<sub>2</sub> em plantas de cimento, seus custos e barreiras à sua utilização.

Diante deste contexto, o presente artigo tem como objetivo analisar a possibilidade de redução de CO<sub>2</sub> pelo setor industrial de cimento, por meio do consumo de fontes energéticas mais limpas.

## **2.SETOR INDUSTRIAL**

Em 2012, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2011) o setor industrial e o setor de transportes respondiam por 70% das emissões na produção e uso da energia, no Brasil. Apesar do uso mais intenso de etanol e biodiesel e de ações no sentido de mitigar emissões na indústria, esses dois setores permanecerão responsáveis pela maior parte das emissões em 2020.

Walter (2007) esclarece que o crescimento das emissões pode ser explicado pelo crescimento populacional, pelo crescimento da renda per capita, pela evolução da intensidade energética (por exemplo, expressa em GJ/\$ do PIB) e pela evolução da intensidade das emissões por unidade de energia (por exemplo, CO<sub>2</sub>/GJ). A intensidade das emissões será tanto menor quanto menor a importância, nas matrizes energéticas, de insumos energéticos de alta intensidade de carbono. Por sua vez, a intensidade energética será tanto menor quanto maior a eficiência de uso da energia e quanto menor a importância de setores energo-intensivos na atividade econômica.

Neste sentido, quando se compara a evolução dos índices de intensidade energética industrial (relação entre energia e valor agregado) de um grupo selecionado de países, nota-se que o Brasil vem

caminhando no sentido contrário ao mundial, como é possível observar no Gráfico 1. No mundo, há redução significativa da intensidade energética da indústria, enquanto que, no Brasil, a intensidade aumenta.

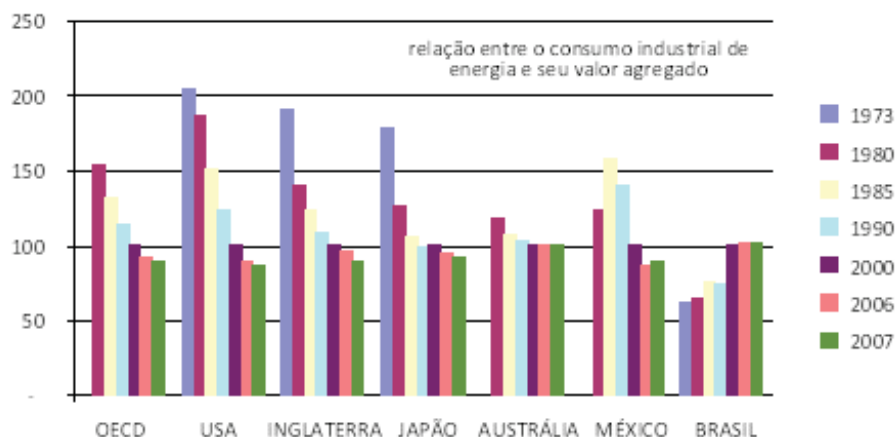


Gráfico 1 – Índices de Intensidade Energética da Indústria.

Fonte: MME (2010)

Essa tendência está relacionada à crescente importância dos setores energo-intensivos na pauta de produção da indústria brasileira. São considerados setores energo-intensivos: metalurgia, papel e celulose, química, mineração e petróleo.

De acordo com os resultados preliminares do BEN 2010, os países ricos, além da inovação tecnológica, transferiram aos países em desenvolvimento grande parte da indústria “pesada” – intensiva em energia e capital (aço, alumínio e outros metais). O Brasil foi um dos países que absorveu parte desta indústria pesada, evidenciado no aumento da participação da indústria no consumo final de energia, 29,8% em 1973 para 35,6% em 2010. Por outro lado, de 1973 para 2007, o consumo industrial de energia dos países da OECD (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) recuou de 955 milhões de tep para 872 milhões de tep, apesar do consumo final total de energia ter aumentado de 3.097 milhões de tep para 4.076 milhões de tep (MME, 2010).

A Tabela 1 apresenta as estruturas setoriais de consumo final de energia do Brasil, OECD e outros países do mundo.

Tabela 1 – Matriz de Consumo Final de Energia, por setor (% e tep) \*Exclusivo Brasil e países da OECD.

Especificação	Brasil		OECD		Outros (*)	
	1973	2010	1973	2007	1973	2007
Indústria	29,8	35,6	30,8	21,4	35,8	28,1
Transporte	25,0	28,8	23,3	30,4	23,4	21,3
Setor Energético	3,3	10,5	8,3	7,5	6,9	8,1
Outros Setores	38,7	18,3	30,4	31,2	29,7	34,7
Uso não-energético	6,9	6,8	7,1	9,6	4,2	7,8
Total (%)	100	100	100	100	100	100
Total - milhões tep	76	240	3.097	4.076	1.478	4.703

Fonte: MME (2010)

Além disso, a partir da Tabela 2 nota-se que o carvão mineral aumenta a participação no Brasil e nos outros países do mundo e cai nos países da OECD. Já na OECD, os combustíveis mais nobres, como gás e eletricidade, são os que mais incrementam suas participações, deslocando derivados do petróleo e carvão mineral.

Tabela 2 – Matriz de Consumo Industrial de Energia, por Fonte (% e tep) \*Exclusivo Brasil e países da OECD.

Especificação	Brasil		OECD		Outros (*)	
	1973	2009	1973	2007	1973	2007
Derivados Petróleo	39,3	16,3	32,6	15,2	24,3	14,2
Gás Natural	0,1	9,4	26,6	30,5	20,4	16,0
Carvão Mineral e derivados	7,0	12,2	18,8	15,0	33,1	39,9
Eletricidade	11,1	20,9	17,7	31,0	20,0	23,4
Biomassa	42,4	41,2	4,4	8,2	2,3	6,4
Total (%)	100	100	100	100	100	100
Total - milhões tep	23	77	955	872	530	1.321

Fonte: MME (2010)

De acordo com o Balanço Energético Nacional (MME, 2012), a estratificação do consumo de energia no Setor Industrial Brasileiro demonstra que grande parte dos recursos energéticos utilizados provém de recursos renováveis, com a participação significativa da cana-de-açúcar e da lenha como recursos energéticos sustentáveis, porém, como já mencionado, as fontes fósseis de energia ainda apresentam uma participação significativa no consumo industrial. Segundo o Plano Nacional de Mudança do Clima (2008), os usos finais dos energé-

ticos e térmicos, sejam eles para produção de bens e serviços de uso final, sejam para a produção de energia elétrica. Essas parcelas de energia destinam-se, nos diferentes segmentos industriais, aos processos de fusão, aquecimento por indução, força motriz, refrigeração, secagem e de iluminação.

Pelo grande consumo energético e pelo alto grau de impactos ambientais causados pelos grandes consumidores e emissores do setor industrial torna-se evidente a necessidade de ações visando à eficiência energética e de ações conjuntas da indústria e dos governos para o alcance de menor grau de emissão de GEE e de poluentes (IPEA, 2010).

De acordo com a Confederação Nacional das Indústrias – CNI (2009), o setor industrial brasileiro está ciente dos riscos do aquecimento global e do papel que lhe cabe na busca pela redução das emissões e nos esforços de adaptação. No entanto, apesar deste setor ter grande contribuição a oferecer no desenvolvimento de tecnologias e de soluções para adaptação, esse tema ainda não está enraizado nas estratégias das empresas, sendo a incorporação da preocupação com adaptação ainda reduzida nas decisões de investimento das empresas do país.

A alteração do mix de combustíveis, ou seja, a substituição dos combustíveis mais intensivos em carbono por outros com menor intensidade, enquadra-se como uma das alternativas para a adaptação do setor industrial a uma economia de baixo carbono. Deste modo, amplia-se a importância deste trabalho, que se baseia na análise de oportunidades de redução do gás carbônico na indústria brasileira, para o setor de cimento, por meio da substituição de fontes não renováveis de energia por fontes renováveis, fornecendo, desta forma, informações com relação aos benefícios de tal substituição, contribuindo para a incorporação da preocupação com a adaptação no setor industrial.

Os estudos foram orientados para o setor de cimento, por ter uma matriz energética extremamente dependente de combustíveis fósseis, como é possível observar no Gráfico 1, que mostra o coque de petróleo como o principal energético deste setor.

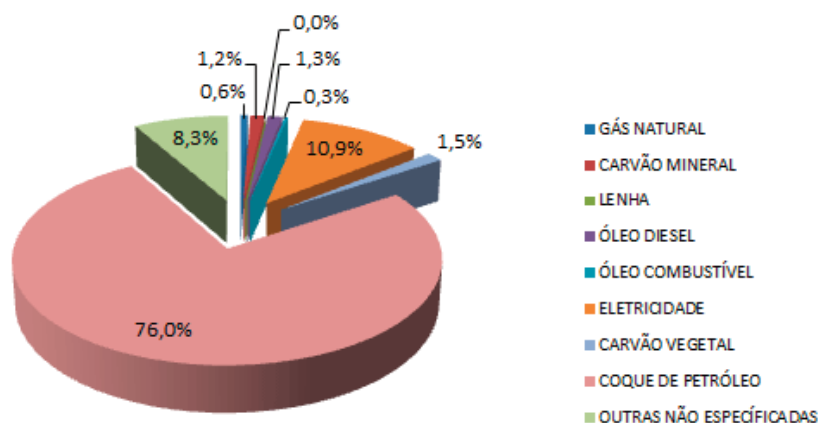


Gráfico 2 - Consumo energético do setor cimento (2011).

Fonte: MME (2012).

De acordo com o IPCC (2011), além de ter um grande potencial para mitigar as mudanças climáticas, as energias mais limpas, em especial as renováveis, podem contribuir para um suprimento de energia seguro, para o acesso à energia, para reduzir os impactos negativos sobre o meio ambiente e saúde, e, por fim, para o desenvolvimento social e econômico. A seguir é apresentada uma breve descrição do setor de cimento e seu respectivo processo produtivo.

De acordo com o IPCC (2011), além de ter um grande potencial para mitigar as mudanças climáticas, as energias mais limpas, em especial as renováveis, podem contribuir para um suprimento de energia seguro, para o acesso à energia, para reduzir os impactos negativos sobre o meio ambiente e saúde, e, por fim, para o desenvolvimento social e econômico. A seguir é apresentada uma breve descrição do setor de cimento e seu respectivo processo produtivo.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DO SETOR DE CIMENTO

A busca do homem por um material de ligação para as construções data de épocas remotas que, após sucessivas pesquisas e avanços, chegou-se ao cimento Portland, que, segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2012), este tipo de cimento, corresponde, hoje, a quase toda a produção de cimento mundial.

O cimento Portland é o produto de uma atividade integrada de exploração e beneficiamento de substâncias minerais (calcário e argila), de sua transformação química em clínquer (cimento não pulverizado) e posterior moagem. Desse modo, a cadeia produtiva deste produto é dividida em seis etapas, segundo SNIC (2012):

- Extração de matéria-prima: ocorre a extração do calcário;
- Britagem: o calcário é reduzido a um diâmetro máximo de 25 mm;

- Moagem da mistura crua: as matérias-primas (calcário, argila e areia) são transformadas em pó;
- Homogeneização da mistura crua: mistura uniforme com composição química para ir ao forno;
- Calcinação (clínquer): aquecimento da farinha crua a 1.450 oC dando origem ao clínquer;
- Moagem do clínquer: adição de gesso completando a fabricação do cimento.

De acordo com Worrell, Martin e Price (2000), a produção do clínquer é a etapa mais intensiva de energia na produção de cimento, correspondendo a mais de 90% do total de energia utilizada nesta indústria.

Para fabricar o clínquer, são utilizados basicamente dois processos principais: o processo seco e o processo úmido. Estes processos se diferem, principalmente, em termos de preparação de matérias-primas. No processo seco as matérias-primas são introduzidas sob a forma de pó com um baixo nível de umidade de água; já no processo úmido é adicionado água durante a moagem dos materiais, produzindo a suspensão aquosa. O clínquer produzido por ambos os processos é essencialmente o mesmo, com nenhuma diferença na qualidade do produto final. No entanto, o consumo médio de energia específica do processo seco é significativamente menor quando comparado com o processo úmido, sendo esta uma significativa vantagem comparativa para indústrias cujas despesas com combustíveis correspondem a cerca de 18% a 20% dos custos totais e 35% a 40% dos custos variáveis. No Brasil, o processo seco é o mais utilizado (SOARES; TOLMAS-QUIM, 2000).

Vale mencionar que o Brasil apresenta um consumo per capita de cimento (271 Kg/hab em 2009) bastante inferior ao consumo per capita mundial (447 Kg/hab em 2009), segundo SNIC (2010). Em 2011, o setor industrial de cimento, de acordo com o BEN 2012, foi responsável por cerca de 5% do consumo final de energia do setor industrial (MME, 2012). Todavia, apesar do baixo consumo energético, este setor apresenta um grande potencial de crescimento, devido à atual expansão da infraestrutura e construção civil. Deve-se considerar, ainda, o possível aumento da demanda que deve ocorrer com a Copa do Mundo e as Olimpíadas (ISTO É DINHEIRO, 2011). Como resultado, haverá uma ampliação da produção de cimento e, conseqüentemente, do consumo energético e das emissões deste setor, caso não haja uma alteração nos padrões de emissão da indústria de cimento, que tende a tornar-se cada vez mais importante para a questão das mudanças climáticas (LIMA, 2010).



Neste contexto, vale destacar que o setor de cimento possui seu processo produtivo dependente de elevadas quantidades de combustíveis fósseis, como é possível observar pela Tabela 3, que apresenta a evolução no uso de combustíveis por este setor industrial, de 2001 a 2011.

Tabela 3 - Estrutura de Consumo do Setor Industrial - Cimento em 103 tep

Fontes	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Gás natural	24	28	14	20	17	18	24	25	15	23	29
Carvão mineral	180	135	211	38	6	66	60	62	57	52	56
Lenha	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Óleo diesel	23	25	26	31	35	33	41	43	42	45	59
Óleo combustível	229	134	91	22	23	23	26	29	29	8	14
Eletricidade	375	343	328	323	345	354	371	411	407	456	502
Carvão vegetal	211	207	247	284	249	261	222	249	55	63	68
Coque de petróleo	2.198	2.125	1.726	1.696	1.881	2.031	2.300	2.561	2.736	3.161	3.512
Outras não especificadas	132	136	165	234	275	300	330	362	335	350	382
<b>Total</b>	<b>3.381</b>	<b>3.132</b>	<b>2.808</b>	<b>2.648</b>	<b>2.831</b>	<b>3.087</b>	<b>3.373</b>	<b>3.742</b>	<b>3.675</b>	<b>4.157</b>	<b>4.622</b>

Fonte: MME (2012)

Verifica-se que o setor de cimento deixou de consumir lenha no seu processo produtivo e vem diminuindo ao longo do tempo o consumo de carvão vegetal, que são combustíveis renováveis. Por outro lado, vem aumentando a participação de fontes fósseis no consumo total de energia do setor, principalmente do coque de petróleo.

De acordo com os resultados do trabalho de Kim e Worrell (2002), esta alteração do mix de combustíveis utilizados, resultando na diminuição do uso da biomassa (carvão vegetal) e no aumento da utilização do petróleo na produção do clínquer, foi um dos principais fatores que contribuíram para o aumento da intensidade e das emissões de CO<sub>2</sub> no setor de cimento brasileiro. Estes autores, ainda, sinalizaram que o mix de combustíveis intensivos em carbono, em muitos

países, indica um potencial de redução de emissões por meio da alteração da matriz por combustíveis menos intensivos em carbono, como o gás natural. Vale mencionar que nesta pesquisa, os autores realizaram uma análise de decomposição usando indicadores físicos para verificar a tendência das emissões de CO<sub>2</sub> na indústria de cimento do Brasil, China, Coréia do Sul e Estados Unidos.

Deve-se ressaltar, no entanto, que, na indústria de cimento, grande parte do CO<sub>2</sub> liberado é proveniente do processo de manufatura. O cimento Portland é feito, primeiramente, do calcário, que corresponde a 80% da matéria-prima. O calcário (CaCO<sub>3</sub>) precisa ser transformado em cal (CaO), antes de seguir para a próxima etapa, e isto é feito por meio do aquecimento do calcário (KLINE; BARCELO, 2012).

Como o CO<sub>2</sub> liberado do calcário puro representa 44% do seu peso original e, como mencionado, ele corresponde a 80% da matéria-prima utilizada, o CO<sub>2</sub> proveniente da matéria-prima é aproximadamente 35% do total dos materiais utilizados na entrada do processo. Portanto, a produção de cimento teria uma elevada emissão de CO<sub>2</sub> mesmo se nenhum combustível fosse requerido no processo (KLINE; BARCELO, 2012).

Portanto, a indústria de cimento emite CO<sub>2</sub> de forma direta e indireta. As emissões diretas de CO<sub>2</sub> provenientes da queima de combustíveis fósseis e as emissões indiretas de CO<sub>2</sub> do consumo de eletricidade são geralmente consideradas como emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas com a energia, enquanto as emissões de CO<sub>2</sub> diretas do processo de calcinação de cimento são geralmente chamadas emissões de CO<sub>2</sub> do processo de cimento (KE et al, 2013).

Diante deste cenário, Soares e Tolmasquim (2000) concluem que a indústria de cimento é um dos principais setores responsáveis pelas emissões de gases do efeito estufa devido a dois fatores: (1) a calcinação de matérias-primas para a produção do cimento Portland; e (2) o consumo dos combustíveis necessários para manter as altas temperaturas exigidas por estes processos.

Considerando isso, Vatopoulos e Tzimas (2012) e Barker et al (2009) afirmam que reduções significativas das emissões globais do setor de cimento só podem ser alcançadas por meio da aplicação de técnicas de captura e estocagem de carbono. Segundo Barker (2013), em muitos aspectos, a indústria do cimento representa uma boa oportunidade para a CAC, porque as fábricas de cimento são relativamente grandes fontes pontuais de CO<sub>2</sub>, a concentração de CO<sub>2</sub> na fábrica de cimento de gases de combustão é relativamente alta e mais de 60% das emissões totais de CO<sub>2</sub> a partir de uma fábrica de cimento moderno são de decomposição mineral, onde as emissões de CO<sub>2</sub> resultantes não podem ser evitadas com o uso de fontes alternativas de energia.

No entanto, o IEA e o WBCSD elaboraram um framework para diminuir a intensidade de CO<sub>2</sub> da produção de cimento. Este framework foca, além da captura e armazenagem de carbono (CAC), em outras três distintas “alavancas de redução”: a eficiência térmica e elétrica, o uso de combustível alternativo e a substituição do clínquer (WBCSD; IEA, 2009).

O documento não prevê a implementação de tecnologias muito avançadas de fabricação do cimento, que viabilizariam a substituição do clínquer, por isso a importância fundamental da CAC para que a indústria reduza suas emissões de forma significativa. Porém, esta alternativa não se encontra desenvolvida a ponto de poder ser aplicada em larga escala no setor.

Já o aumento da eficiência energética através do uso de tecnologias mais eficientes, segundo Benhelal et al (2013), pode contribuir significativamente para atenuar as emissões globais de gases poluentes e partículas sólidas. Economia de combustível e energia também é uma estratégia eficaz para retardar o esgotamento dos combustíveis fósseis. De acordo com estes autores, que discutiram em seu trabalho as estratégias e potencialidades globais para a mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> em fábricas de cimento, este objetivo tem sido alcançado através de diferentes abordagens, incluindo: modificação de processos, integração de processos, otimização da planta, manutenção, isolamento, recuperação de energia, entre outros.

No entanto, Lima (2010), afirma que não é uma opção tão promissora no Brasil, uma vez que as fábricas nacionais são relativamente modernas, produzindo clínquer com consumo energético de 3,65 JG/t, que é o mesmo patamar médio europeu, encontrando-se entre os menores consumos energéticos mundiais. Embora este consumo possa se aproximar de 3,1 JG/t, que é o padrão japonês, isso demanda aplicação de tecnologia ainda mais moderna em todas as fábricas nacionais, o que pode ser impraticável em curto prazo.

Porém, o documento é bastante crítico ao afirmar que todas as tecnologias e oportunidades mencionadas, incluindo a utilização de combustíveis menos poluentes, devem ser aplicadas de forma conjunta para que os melhores cenários sejam alcançados – nenhuma opção por si só pode produzir as necessárias reduções das emissões (WBCSD; IEA, 2009).

Considerando este contexto, justifica-se o foco deste trabalho em quantificar a potencial contribuição da alteração da matriz energética, do setor de cimento, para a redução dos GEE. Deste modo, a seguir, é apresentado o método para atingir o objetivo proposto, além dos resultados obtidos a partir da elaboração dos inventários de emissão de dióxido de carbono do setor de cimento.

#### 4.MÉTODOS

A partir do Balanço Energético Nacional, foi possível identificar os atuais combustíveis utilizados pelo setor industrial em estudo. O próximo passo foi a mensuração das emissões de CO<sub>2</sub> considerando as fontes atualmente utilizadas e alterações hipotéticas da matriz energética por possíveis substitutos dessas fontes. Reitera-se que os valores foram calculados em escala anual (ano de 2011) e foi considerado todo o território nacional.

Assim sendo, buscou-se qualificar, com relação ao impacto ambiental e suas emissões, os combustíveis utilizados nos processos produtivos do setor de cimento.

Destaca-se, no entanto, que a quantificação mais adequada para os combustíveis provenientes da biomassa deveria ser feita considerando as mudanças no uso do solo e florestas. O que o método Top-Down propõe é uma quantificação destes energéticos sem considerar a captura de CO<sub>2</sub> destes combustíveis durante seu estágio de desenvolvimento característico.

Logo, as estimativas visam atender à recomendação do IPCC de que as emissões de CO<sub>2</sub> da biomassa devem ser incluídas, apenas a título de informação, sem serem adicionadas às emissões dos combustíveis fósseis. Os combustíveis de origem renovável não geram emissões líquidas e as emissões associadas à parcela não renovável são incluídas no setor de Mudança do Uso da Terra e Florestas. O método de quantificação será detalhado no próximo item.

Destaca-se que não são observadas, na indústria, emissões decorrentes do uso de energia elétrica, uma vez que essas emissões ocorrem durante a geração da mesma. No entanto, vale ressaltar que existe uma grande diversidade de formas de geração deste tipo de energia. Logo, as emissões da energia elétrica não foram abordadas no presente trabalho.

##### **4.1 O método top-down de quantificação das emissões de CO<sub>2</sub>**

De acordo com Ke et al (2013), as diretrizes do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa são baseadas em uma análise rigorosa e científica e pode fornecer resultados de cálculos abrangentes e confiáveis. Existem dois métodos desenvolvidos pelo IPCC que permitem o cálculo de emissões de CO<sub>2</sub>: o bottom-up e o top-down. Pela maior confiabilidade dos dados e menor complexidade para o levantamento destes, o método top-down foi o mais difundido (SIMÕES, 2003).

No entanto, Ke et al (2013) ressalta que os fatores de emissão e as estatísticas energéticas específicas e atualizadas de cada país são preferidas para estimar as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da queima de combustível na produção de cimento. Porém, os fatores de emissão padrão do IPCC para queima de combustíveis fósseis são recomendados, na ausência de dados relevantes e específicos.

Considerando isso, de acordo com o Ministério de Ciências e Tecnologia - MCT (2006), para a aplicação do método top-down do IPCC é necessário realizar a seguinte sequência de passos:

a) Determinação do consumo aparente dos combustíveis, nas suas unidades de medida originais: neste trabalho, foi utilizado o consumo direto dos setores em estudo, com o objetivo de representar as emissões específicas dos segmentos estudados. Deste modo, foram utilizados o consumo dos combustíveis usados na produção industrial e o consumo total de cada setor. Estes dados foram encontrados no BEN.

b) Conversão do consumo aparente para uma unidade de energia comum, terajoules (TJ): as quantidades dos combustíveis são expressas pelo BEN em toneladas equivalentes de petróleo (tep), para converter os valores do BEN para TJ, conforme recomendação do IPCC (1996), deve-se multiplicar  $45,217 \times 10^{-3}$  pelo fator de correção, este é igual a 0,95 para os combustíveis sólidos e líquidos e 0,90 para os combustíveis gasosos (MCT, 2006).

c) Transformação do consumo aparente de cada combustível em conteúdo de carbono, mediante a sua multiplicação pelo fator de emissão de carbono do combustível: nesta pesquisa, os valores utilizados para o fator de emissão foram aqueles indicados pelo MCT (2006). Além disso, quando, ao invés de indicar o consumo de cada um dos energéticos pelo setor, o BEN indicava a somatória do consumo de energia de duas fontes, foi considerado, como fator de emissão, a média dos fatores dos dois combustíveis.

d) 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: foi utilizado como referência o consumo de fontes de energia dos setores industriais divulgados no BEN 2012 (MME, 2012), no qual todo combustível é considerado de uso energético. Logo, o único valor relevante para o cálculo das emissões foi do carbono não oxidado, explicado a seguir.

e) Correção dos valores para se considerar a combustão incompleta do combustível, para se computar a quantidade de carbono realmente oxidada na combustão: a fração de carbono oxidada foi a

mesma utilizada pelo MCT (2006).

f) Conversão da quantidade de carbono oxidada em emissões de CO<sub>2</sub>: foi obtida multiplicando-se as emissões em termos de carbono por 44/12. Onde 44 é o peso molecular do CO<sub>2</sub> e 12 é o peso atômico do carbono (C).

## 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir do BEN 2012 (MME, 2012), foi possível verificar o consumo energético por fonte de energia em 2011, para o setor industrial de cimento. Com isso, foram mensuradas as respectivas emissões de CO<sub>2</sub> deste setor por meio do método Top Down. Ressalta-se, porém, que por não especificar o tipo de fonte energética que provém 8,3% do consumo energético, não foi possível calcular as emissões desta parcela do consumo de energia pelo setor de cimento. As etapas necessárias para obtenção do resultado final foram dispostas na Tabela 4, como apresentada a seguir.

Tabela 4 – Etapas de quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> (2011)

Combustível	Consumo (tep)	Consumo (TJ)	Conteúdo de carbono (t C)	Emissão de carbono (Gg C)	Emissão de CO <sub>2</sub> (106 t CO <sub>2</sub> )
Gás natural	29.040,00	1.181,79	18.081,41	17,99	0,07
Carvão mineral	55.772,51	2.395,77	61.810,92	60,57	0,22
Lenha	-	-	-	-	-
Óleo diesel	59.299,84	2.547,29	51.455,32	50,94	0,19
Óleo combustível	13.502,30	580,01	12.238,15	12,12	0,04
Eletricidade	501.815,16	-	-	-	-
Carvão vegetal	68.212,76	2.930,16	87.611,70	77,10	0,28
Coque de petróleo	3.511.969,02	150.860,67	4.148.668,37	4.107,18	15,06
Outras não especificadas	382.057,95	-	-	-	-

Reitera-se que os valores são calculados em escala anual e é considerado todo o território brasileiro. Assim sendo, foi possível elaborar o Gráfico 2, que apresenta a participação de cada combustível nas emissões de CO<sub>2</sub> no setor industrial de cimento.

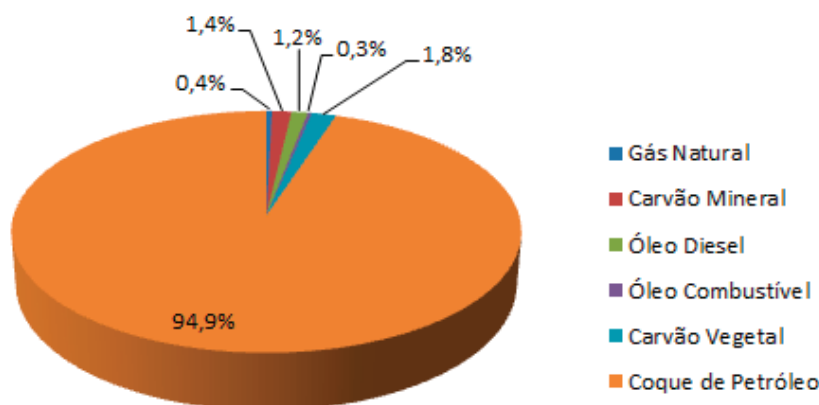


Gráfico 3 - Emissões de CO<sub>2</sub> por combustível no setor de cimento (%)

Observa-se que, devido ao elevado consumo, o coque de petróleo é o maior responsável pelas elevadas emissões atmosféricas de CO<sub>2</sub> do setor de cimento. O combustível emitiu 15,06 x 10<sup>6</sup> toneladas (t) de CO<sub>2</sub>, correspondendo a 94,9% do total das emissões.

Segundo o BEN 2012, este setor, ainda, consome uma pequena quantidade de carvão vegetal, responsável por 1,8% das emissões (MME, 2012). No entanto, ressalta-se que, no caso de indústrias que produzem os próprios combustíveis renováveis, por meio da reposição da biomassa utilizada no processo produtivo, considera-se que não há emissões de gás carbônico. No entanto, tal característica de captura do CO<sub>2</sub> não foi mensurada nos cálculos efetuados.

Diante destes resultados, é possível concluir que a substituição do coque de petróleo traria grandes modificações à quantidade de dióxido de carbono emitido na atmosfera por este setor industrial.

Segundo o WBCSD e o IEA (2009), muitos combustíveis alternativos podem ser utilizados na substituição do coque de petróleo, como por exemplo: resíduos de pneus; resíduos sólidos industriais e municipais pré-tratados; resíduos de óleo e solvente; resíduos de plástico, papel e têxtil; e biomassa (farinhas de origem animal, resíduos de madeira, madeira e papel reciclados, resíduos agrícolas como casca de arroz ou serragem, entre outros).

Benhelal et al (2013) afirmam, a partir do seu estudo, que entre todos os combustíveis alternativos, o combustível derivado de resíduos (CDR) ao ser utilizado na planta parece ser o mais ambientalmente amigável. Resíduos industriais utilizados como combustíveis, matérias-primas e substitutos de clínquer, contribuem significativamente na redução das emissões, uma vez que, simultaneamente, reduzem as emissões de CO<sub>2</sub> das fábricas de cimento e dos aterros sanitários. Deste modo, nota-se que esta redução das emissões é indireta, pois o CDR não é utilizado no processo de cimento, como a principal fonte de energia. Porém, quando não utilizado como energético deve ser

destruído por incineradores ou serem enviados para os aterros sanitários, gerando mais CO<sub>2</sub> além do CO<sub>2</sub> gerado pelo combustível fóssil, quando não substituído.

Porém, de acordo com Lima (2010), apesar da utilização destes resíduos reduzir a necessidade do uso de combustíveis fósseis, devem ser considerados fatores negativos, como maiores fatores de emissão de alguns resíduos com relação a alguns combustíveis fósseis e possibilidade de geração de poluição ambiental.

Destaca-se, porém, que para a análise deste trabalho, foram considerados os combustíveis mencionados pelo Balanço Energético Nacional, que já são amplamente utilizados pelo setor de cimento brasileiro.

A partir dos dados de consumo energético, também, foi realizada a quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> supondo que todo o consumo energético da indústria brasileira de cimento seja abastecido por apenas um combustível. De acordo com BEN 2012, o consumo total para o ano de 2011 foi de 4.120 x 10<sup>3</sup> tep (MME, 2010). Desconsiderou-se, nesse total, o consumo por eletricidade, o qual não é o foco da pesquisa, e o consumo por outras fontes não especificadas. Fixando este consumo para cada combustível utilizado na indústria (etapa 1 do método Top-Down), é possível estimar quanto se emitiria, caso toda a matriz energética fosse substituída por este combustível. Assim, a Tabela 5 mostra o resultado obtido para as emissões de CO<sub>2</sub> de cada combustível, como se este fosse utilizado como único suprimento para toda a demanda energética do setor.

Tabela 5 - Emissões de CO<sub>2</sub> considerando consumo total do setor por apenas um combustível

Combustível	Emissão de CO <sub>2</sub> (10 <sup>6</sup> t CO <sub>2</sub> )
Gás Natural	9,36
Carvão Mineral	16,41
Lenha	16,88
Óleo Diesel	12,98
Óleo Combustível	13,56
Eletricidade	-
Carvão Vegetal	17,07
Coque de Petróleo	17,67
Outras não especificadas	-

Nota-se que os combustíveis que mais emitem gás carbônico, para o mesmo consumo de energia são, respectivamente, o coque de petróleo, o carvão vegetal e a lenha. Apesar desta última não ser mais



consumida pelo setor, julgou-se interessante estudar as suas emissões, a fim de verificar as vantagens de inseri-la novamente na matriz energética do setor de cimento, considerando, assim, a possibilidade de elaborar novas políticas para o incentivo deste energético, com o devido respeito ambiental.

Analisando somente as emissões de CO<sub>2</sub>, percebe-se, ainda, que, dentre os combustíveis analisados, o gás natural se mostrou o menos poluente, emitindo quase metade do CO<sub>2</sub> emitido pelo coque de petróleo. Isso ocorre devido ao fator de conversão e ao fator de emissão de carbono.

A partir do consumo total real do setor, com sua matriz energética diversificada, e considerando, também, a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida pelos combustíveis, supondo que os mesmos sejam utilizados na indústria de cimento de forma exclusiva, elaborou-se o Gráfico 4, a seguir.

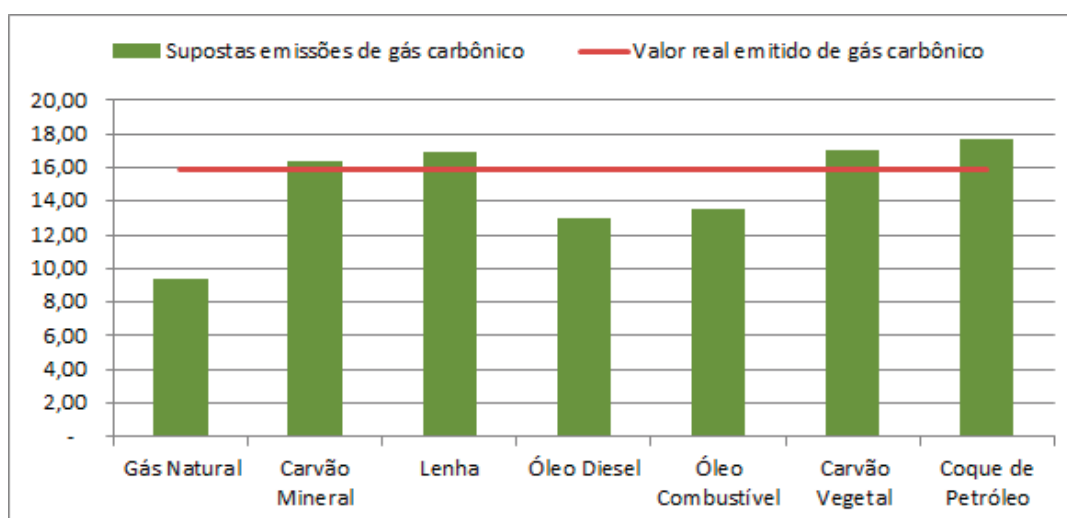


Gráfico 4 - Emissões de CO<sub>2</sub> supondo o consumo de apenas um combustível (em 106 t de CO<sub>2</sub>). \*O consumo de energia por eletricidade e por outras fontes não especificadas não foi computado na estimativa do valor real emitido.

Observa-se que, se fosse possível utilizar apenas um combustível na indústria de cimento para suprir sua demanda energética, o coque de petróleo seria o energético mais poluente, com o valor de emissão bem próximo do emitido no período analisado. Em contrapartida, as emissões de CO<sub>2</sub> seriam menores para o gás natural se o mesmo fosse utilizado de forma exclusiva na matriz energética do setor.

Estes resultados indicam um potencial significativo para reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> pelo setor industrial de cimento, por meio da utilização do gás natural, em substituição aos demais combustíveis fósseis, quando possível.

Nota-se, ainda, que, se mantido o mesmo consumo energético, o coque de petróleo é o maior emissor de gás carbônico, seguido do carvão vegetal e da lenha. Entretanto, o método Top-Down do IPCC não considera em seus cálculos a condição de combustível renovável do carvão vegetal, que absorve CO<sub>2</sub> da atmosfera no desenvolvimento da planta que gera a lenha, que por sua vez produzirá o carvão. Portanto, vale ressaltar que o uso do carvão vegetal e da lenha 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 petróleo, diferente do carvão vegetal e da lenha, 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, este energético não irá absorver o CO<sub>2</sub> emitido, 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 dos outros combustíveis não renováveis, que embora emitam menos gás carbônico para suprir a mesma demanda energética, também, possuem suas reservas naturais limitadas em longo período de tempo.

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<sub>2</sub> 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 a outro mais poluente.

Para o setor de cimento, no entanto, como o coque de petróleo supera em muito o consumo dos demais combustíveis, sendo responsável por 95% das emissões do setor, optou-se por supor, para este setor, que o consumo deste combustível fosse suprido por uma das demais fontes de energia já utilizadas.

Para melhor comparação dos resultados, o Gráfico 5 mostra, a seguir, as emissões de CO<sub>2</sub>, considerando a substituição do coque de petróleo, com o uso do gás natural, do carvão mineral, da lenha, do óleo diesel, do óleo combustível ou do carvão vegetal como principais combustíveis.

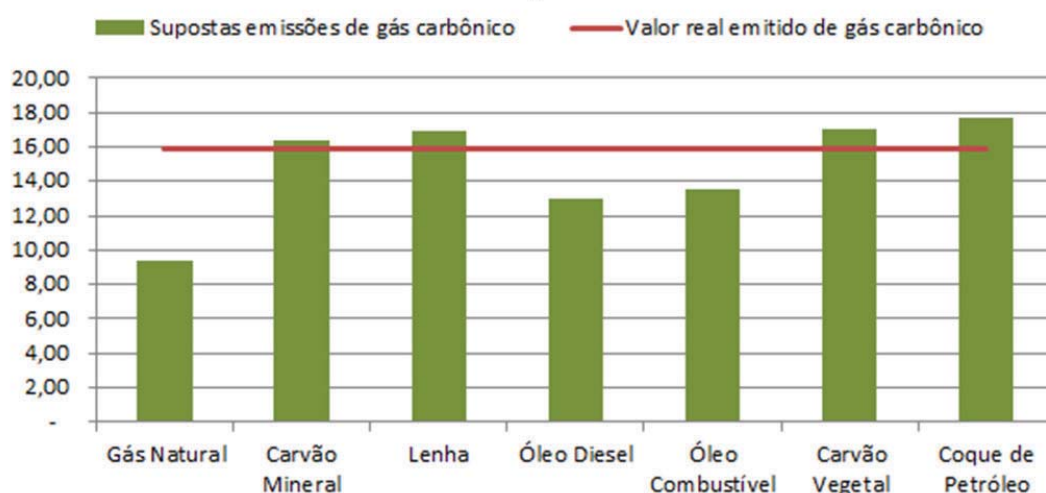


Gráfico 5 - Emissões totais de CO2 supondo substituição do coque de petróleo (em 106 t de CO2)

A partir do Gráfico 4, fica evidente que as emissões serão menores supondo a substituição do coque de petróleo pelo gás natural, sendo este o combustível que, segundo a análise, melhor contribuiria para a redução das emissões no processo industrial do setor de cimento. Considerando esta suposição, mantendo o uso das demais fontes energéticas, as emissões de CO2, deste setor industrial, passariam de 15,86 x 106 t de CO2 para 8,04 x 106 t de CO2. Por outro lado, as emissões seriam maiores no caso da utilização do carvão vegetal ao invés do coque de petróleo, mas ainda assim elas seriam menores do que as atuais emissões do setor, diminuindo para 14,84 x 106 t de CO2. Em seguida, com as maiores emissões, encontra-se a lenha e o carvão mineral, respectivamente. Porém, vale salientar, novamente, que o método utilizado nessa pesquisa não considera o fator de combustível renovável do carvão vegetal e da lenha, o que garante que o CO2 seja repostado em sua forma orgânica e em oxigênio, quando o mesmo é obtido de áreas reflorestadas e certificadas.

Assim sendo, vale salientar que os combustíveis fósseis, mesmo quando apresentam menores emissões de GEE quando comparados com combustíveis de caráter renovável, não reduzem o gás carbônico da atmosfera num ritmo compatível com o desenvolvimento humano, contribuindo com o aquecimento global.

Portanto, pode-se concluir que a remoção do coque de petróleo e do carvão mineral na indústria de cimento, no Brasil, é ambientalmente viável para a introdução do carvão vegetal ou da lenha, devido ao caráter renovável destes combustíveis, ou, ainda, para a introdução do gás natural; uma vez que este, mesmo sendo um combustível fóssil, apresenta baixas emissões.

No entanto, apesar da reconhecida vantagem ambiental da substituição total do coque obtido a partir do carvão mineral pelo carvão vegetal ou lenha, na indústria de cimento, quando este energético é proveniente de florestas plantadas, ressalta-se que a hipotética migração de toda a indústria para a utilização de carvão vegetal ou lenha causaria um drástico aumento na demanda por essa matéria-prima no mercado, o que implicaria na exigência de extensas áreas para plantio de florestas destinadas a produção de carvão vegetal.

Ressalta-se, entretanto, que não é o intuito deste trabalho o incentivo à utilização de uma única fonte de energia pelo setor industrial em estudo. Tal procedimento comprometeria, entre outros aspectos, a segurança energética do setor. No entanto, destaca-se a importância da utilização de energéticos alternativos, principalmente os renováveis (como o carvão vegetal), devido aos benefícios ambientais proporcionados por eles.

Vale mencionar que no setor de cimento, de acordo com Lima (2010), a utilização de combustíveis renováveis tem a possibilidade de reduzir as emissões deste segmento em até 33%. Porém, esta opção tem relação direta com os custos de produção e a competitividade das empresas do setor cimenteiro e dos outros setores para os quais este energético se apresente como alternativa. Logo, políticas públicas que incentivem o uso de energéticos renováveis por estes setores são fundamentais para viabilizar a substituição energética por combustíveis mais limpos.

Apesar de Huesemann (2003) afirmar que será extremamente difícil promover uma mudança para um sistema industrial e econômico baseado exclusivamente em fontes renováveis, o estudo de Deng, Blok e Leun (2012) sugere que, apenas utilizando as tecnologias existentes, seria possível fornecer até 95% da energia mundial de forma renovável, até o ano de 2050. Para isso, o documento propõe, além do uso de fontes renováveis, a utilização de diversas técnicas de eficiência energética, o que implicaria na redução do consumo de energia mundial.

Destaca-se, no entanto, que o Brasil tem demonstrado a capacidade de adotar e efetivamente implementar políticas energéticas e tecnologias inovadoras, como exemplificado pelo programa do PRO-ÁCOOL e os esforços para aumentar a eficiência no uso da eletricidade. Estes esforços envolveram um compromisso de longo prazo do governo; um conjunto abrangente de políticas para superar barreiras técnicas, institucionais e de mercado; e uma participação ativa do setor privado (GELLER et al, 2004). Uma estratégia semelhante poderia ser usada para implementar com sucesso um conjunto de políticas para incentivar o uso do carvão vegetal e outras fontes renováveis pela

indústria, com os devidos cuidados, de modo a não comprometer outros aspectos ou setores do país, como o de produção de alimentos ou, ainda, de biocombustíveis.

Igualmente, ressalta-se a importância de uma política de incentivo para o gás natural. Os benefícios ambientais da utilização do gás natural como combustível, na indústria, ficaram evidentes a partir dos inventários realizados. Os mesmos indicaram um potencial significativo para reduzir as emissões de dióxido de carbono do setor de cimento por meio da utilização deste energético em substituição aos demais combustíveis fósseis. Além disso, as recentes descobertas de reservas proporcionam uma excelente perspectiva de expansão da oferta deste energético.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A implementação de medidas de mitigação de emissões, para que o crescimento econômico não gere prejuízos ambientais e sociais, é, atualmente, um dos maiores desafios do setor industrial. Considerando esta situação, este trabalho pode ser uma ferramenta importante para auxiliar no desenvolvimento de planos e programas que compõem as políticas energéticas voltadas para o setor industrial. O trabalho permite analisar a estrutura de consumo energético do setor industrial de cimento, a fim de melhor entender os resultados ao introduzir novos energéticos, que gerem benefícios ambientais, além de fornecer uma base de informações importante para o desenvolvimento sustentável deste segmento.

A comparação do nível de emissão do coque de petróleo com os seus possíveis substitutos permitiram concluir que, devido à compensação do alto nível de emissão gerada pelo carvão vegetal com a captura de CO<sub>2</sub> durante a fotossíntese, a remoção do coque de petróleo na indústria de cimento, no Brasil, é ambientalmente viável para a introdução de combustíveis renováveis, como o carvão vegetal, desde que este seja proveniente de matas de reflorestamento destinadas à indústria. No entanto, para a expansão da biomassa para geração de energia, deve ocorrer o gerenciamento das demandas competitivas da produção de alimentos e preservação das matas nativas. Deste modo, destaca-se como possibilidade de futuros trabalhos a análise do impacto da demanda de carvão vegetal oriundo de reflorestamento, considerando as atuais áreas destinadas a este fim, além do risco de maior desmatamento e concorrência com a produção de alimentos.

Além disso, ressalta-se que resíduos industriais utilizados como combustíveis, matérias-primas e substitutos de clínquer, contribuem significativamente na redução das emissões, uma vez que, simultaneamente, reduzem as emissões de CO<sub>2</sub> das fábricas de cimento

e dos aterros sanitários. Portanto, esta é, também, uma importante alternativa para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> no setor de cimento.

Vale destacar, ainda, que medidas de eficiência energética, também, são viáveis, contribuindo para a mitigação de emissões pelo setor em estudo. Para isso, basta introduzir tecnologias que possam reduzir o consumo de energia no processo, mantendo o mesmo nível de produção. Além disso, técnicas de captura e estocagem de carbono (CAC) cada vez mais vêm se tornando uma boa opção para promover reduções significativas das emissões globais do setor de cimento.

A proposta apresentada neste estudo, de substituir os combustíveis fósseis intensivos em carbono por fontes renováveis como uma estratégia de mitigação, para os impactos relacionados com a poluição das atividades do setor de cimento, podem ser replicadas a outros setores industriais. Se estas medidas forem aplicadas a todos os setores, seria possível reduzir grande parte da poluição gerada pelas atividades industriais, contribuindo assim para um futuro melhor para as gerações presentes e futuras.

Por fim, é importante ressaltar que o Brasil apresenta um grande potencial em relação ao uso de energias renováveis, devido ao clima adequado e à diversidade de terras para o cultivo de insumos energéticos renováveis. No entanto, vale salientar a importância de incentivos do governo para concretizar as mudanças na estrutura de consumo de energia, reduzindo, desta forma, os custos de conversão para as novas fontes de energia. Também, é importante um maior controle por parte dos órgãos de controle ambiental e dos consumidores, a fim de incentivar a prática de processos industriais menos poluentes.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BARKER, D. J. et al. CO<sub>2</sub> Capture in the Cement Industry, *Energy Procedia*, v.1, p. 87-94, 2009.

BENHELAL, E., G. et al.. Global strategies and potentials to curb CO<sub>2</sub> emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 51, p. 142-161, 2013

CNI – Confederação Nacional da Indústria. *Mudança do Clima: uma contribuição da indústria*. Brasília, 2009. Disponível em: < <http://www.cni.org.br>>. Acesso em: 08 set. 2011.

DENG, Y. Y.; BLOK, K.; LEUN, K. D.V. Transition to a fully sustainable global energy system. *Energy Strategy Reviews*. v. 1, n. 2, p. 109-121, 2012.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2020*, 2011. Disponível em: < <http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 13 set. 2011.

FREITAS L. C.; KANEKO S. Decomposition of CO<sub>2</sub> emissions change from energy consumption in Brazil: Challenges and policy implications. *Energy Policy*, v. 39, p. 1495-1504, 2011.

GELLER, H.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A.; TOLMASQUIM, M. Policies for advancing energy efficiency and renewable energy use in Brazil. *Energy Policy*, v.32, n.12, p.1437-1450, 2004.

GOLDEMBERG, J. & MOREIRA, J. R. Política energética no Brasil. *Estudos Avançados*, v. 19, n 55, p. 215-228, 2005.

HUESEMANN, M.H. The limits of technological solutions to sustainable development. *Clean Techn Environ Policy*, v. 5, p. 21–34, 2003.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change., Greenhouse gas inventory reporting instructions – Revised IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. In: United Nations Environment Program, the Organization for Economic Co-operation and Development and the International Energy Agency, London, 1996.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change., Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2011. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2011.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada. Sustentabilidade Ambiental no Brasil: biodiversidade, economia e bem-estar humano. Brasília, Ipea, 2010.

ISTO É DINHEIRO. Votorantim Engaja Clientes. Isto é Dinheiro, 06 de abril de 2011.

KE, J., M. Estimation of CO<sub>2</sub> emissions from China's cement production: Methodologies and uncertainties. *Energy Policy*, v. 57, p. 172-181, 2013.

KIM, Y.; WORRELL, E. CO<sub>2</sub> emission trends in the cement industry: An international comparison. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 7, n. 2, p. 115-133, 2002.

KLINE, J.; BARCELO, L. Cement and CO<sub>2</sub>, a victim of success!, In: IEEE Cement Industry Technical Conference (Paper). San Antonio, TX, 2012.

KOLK A.; PINKSE, J. Market strategies for climate change. European Management Journal, v. 22, p. 304-314, 2004.

LIMA, J.A.R. Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2010.

LIOR, N. The current status and possible sustainable paths to energy “generation” and Use. Nuclear & Renewable Energy Conference (IN-REC), 2010 1st International, 2010.

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia, 2006. Emissões de dióxido de carbono por queima de combustíveis: abordagem top-down. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em: 05 nov. 2010.

MIKULČIĆ, H., M. et al. Reducing the CO<sub>2</sub> emissions in Croatian cement industry. Applied Energy, v. 101, p. 41-48, 2013.

MIKULČIĆ, H. et al. The application of CFD modelling to support the reduction of CO<sub>2</sub> emissions in cement industry. Energy, v. 45, n. 1, p. 464-473, 2012.

MME - Ministério das Minas e Energia. 2012. Balanço Energético Nacional – BEN 2012 (Ano base 2011), MME, Brasília, 2012. Disponível em: < [http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas\\_publicacoes.html](http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html)>. Acesso em: 19 nov. 2012.

MME - Ministério das Minas e Energia. 2010. Resultados Preliminares do Balanço Energético Nacional 2010 (Ano-Base 2009), MME, Brasília, 2010. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20100429\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20100429_1.pdf)>. Acesso em: 01 fev. 2010.

ONU. Organização das Nações Unidas. 2012. Rio+20: Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/rio20/>>. Acesso em: 25 fev. 2013.

PAZ, L. R. L.; SILVA, N. F.; ROSA, L. P. The paradigm of sustainability in the Brazilian energy sector. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 11, p. 1558-1570, 2007.

PERRELS, A. Wavering between radical and realistic sustainable consumption policies: in search for the best feasible trajectories. Journal of Cleaner Production, v. 16, n. 11, p. 1203-1217, 2008.



PNMC. Plano Nacional sobre Mudança do Clima. 2008. Apresenta o plano estabelecido a partir das diretrizes gerais da Política Nacional sobre Mudança do Clima. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 01 out. 2010.

SILVA, F. I. A.; GUERRA, S. M. G. Analysis of the energy intensity evolution in the Brazilian industrial sector - 1995 to 2005. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n 9, p. 2589-2596, 2009.

SIMÕES, A. F. O Transporte Aéreo Brasileiro no Contexto de Mudanças Climáticas Globais: Emissões de CO<sub>2</sub> e Alternativas de Mitigação. 2003. 228p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro.

SIMÕES, A.; LA ROVERE E. L. Energy Sources and Global Climate Change: The Brazilian Case. *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization & Environmental Effects*, v. 30, p. 1327-1344, 2008.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. 2012. Etapas de produção. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/>>. Acesso em: 15 mar. 2012.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO. 2010. Relatório Anual 2010. Disponível em: < <http://www.snic.org.br/> >. Acesso em: 19 set. 2012.

SOARES, J. B.; TOLMASQUIM, M.T. Energy efficiency and reduction of CO<sub>2</sub> emissions through 2015: The Brazilian cement industry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 5, n.3, p. 297-318, 2000.

VATOPOULOS, K.; TZIMAS, E. Assessment of CO<sub>2</sub> capture technologies in cement manufacturing process. *Journal of Cleaner Production*, v. 32, p. 251-261, 2012.

WALTER ,A. As Mudanças Climáticas e a Questão Energética. *Revista Multiciência*, Ed. 8, 2007.

WBCSD; IEA. Cement Technology Roadmap 2009, Carbon Emissions Reduction up to 2050, World Business Council for Sustainable Development and International Energy Agency, Paris, 2009. Disponível em: < <http://www.wbcscement.org/index.php/key-issues/climate-protection/technology-roadmap>>. Acesso em: 13 ago. 2012.

WORRELL, E.; MARTIN, N.; PRICE, L. Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry. *Energy*, v. 25, n. 12, p. 1189-1214, 2000.

