



Rem: Revista Escola de Minas

ISSN: 0370-4467

editor@rem.com.br

Escola de Minas

Brasil

Licks, Letícia A.; Pires, Marçal

Metodologia para o cálculo de emissões de carbono e da eficiência na geração de energia pela combustão do carvão fóssil no Brasil

Rem: Revista Escola de Minas, vol. 63, núm. 2, abril-junio, 2010, pp. 331-337

Escola de Minas

Ouro Preto, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56416596017>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Metodologia para o cálculo de emissões de carbono e da eficiência na geração de energia pela combustão do carvão fóssil no Brasil

(Methodology for the calculation of carbon emissions and efficiency in the electricity generation by coal combustion in Brazil)

Resumo

Esse trabalho tem por objetivo avaliar as emissões de dióxido de carbono (CO_2) emitido pela queima do carvão fóssil no Brasil. Uma metodologia é proposta para o cálculo dessas emissões utilizando coeficientes de emissão de carbono específicos para os carvões nacionais. Foram, também, considerados a utilização de combustíveis secundários e a geração de eletricidade nos cálculos. Os resultados obtidos indicaram emissões de carbono de $1.794 \text{ Gg.ano}^{-1}$ para o ano de 2002. Em alguns casos, o valor obtido foi 20% menor que o calculado com a metodologia oficial (MCT), que desconsidera o teor de umidade do carvão e utiliza coeficientes genéricos não adaptados aos carvões nacionais. Os resultados evidenciam a necessidade da revisão dos inventários de emissão e a modernização dos sistemas de combustão, como alternativa para o uso sustentável do carvão fóssil no país.

Palavras-chave: Carvão, emissão de carbono, combustão.

Abstract

This study aims to evaluate the carbon dioxide (CO_2) emissions from coal combustion in Brazil. A methodology using the emission factors estimated specifically for Brazilian coals is proposed. The use of secondary fuels and the electricity produced by the power plants were also considered in the calculations. The results obtained indicated carbon emissions of $1,794 \text{ Gg year}^{-1}$ for 2002. In some cases 20% lower emissions were observed in comparison to the official methodology (MCT) that does not consider coal moisture and uses generic emission coefficients not adapted for Brazilian coal. The results suggest that national inventories must be revised and combustion systems should be updated in order to increase efficiency and to reduce CO_2 emissions as a sustainable measure for the coal use in the country.

Keywords: Coal, carbon emission, combustion.

Letícia A. Licks

Engenheira Química, M.Sc.
FAQUI, CEPAC / PUCRS
E-mail: le.ticia@terra.com.br

Marçal Pires

Engenheiro Químico
Prof. Dr., FAQUI, CEPAC / PUCRS
E-mail: mpires@pucrs.br

1. Introdução

O Primeiro Inventário Nacional de Emissão de Carbono produzido pelo Ministério de Ciência e Tecnologia - MCT (Brasil, 2002) apresenta dados referentes aos anos de 1990-1994, utilizando metodologia recomendada pelo Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. Esses tipos de inventários, normalmente, são de difícil validação, pois necessitam de diversas informações, que nem sempre são bem quantificadas, gerando algumas imprecisões. No que concerne à emissão pela queima de carvão, várias simplificações foram adotadas, em função da dificuldade de obtenção de dados específicos para as condições do país. Cabe salientar que o carvão brasileiro apresenta características singulares, como elevados teores de cinzas e baixo poder calorífico, fatores importantes na quantificação do CO₂ gerado durante os processos de combustão.

Entretanto a quantificação das emissões CO₂, apesar de não ser uma atividade fácil, é importante, pois está relacionada à nossa responsabilidade perante o desenvolvimento sustentável mundial. Para a implementação de uma metodologia correta de inventário, é necessário ter em mente que os dados utilizados devem refletir a realidade e que os resultados obtidos devem suprir os interesses de todas as partes envolvidas e devem atender à legislação ambiental (Xavier, 2004). Cabe destacar o esforço de muitas empresas brasileiras, que vêm tentando se enquadrar em projetos de mecanismos de desenvolvimento limpo, cujas metodologias necessitam estimativas precisas do carbono emitido em nível nacional (IPCC, 2007). Nesse contexto, o trabalho propõe uma metodologia para os cálculos de emissões que contemple, de forma mais ampla, a quantidade de CO₂ emitida para a atmosfera.

Para a realização desse tipo de cálculo, deve ser realizada uma revisão bibliográfica, utilizando-se de diversas fontes de dados referentes às quantidades de combustíveis primários (carvão) e secundários (óleo combustível e diesel) e às características desses combustíveis (umidade, poder calorífico inferior, teor de carbono, coeficientes de emissão).

Deve-se considerar, também, a emissão de CO₂ por fontes industriais, visto que algumas indústrias também utilizam a combustão de carvão para a geração de energia.

Esse trabalho tem por objetivo avaliar as emissões de dióxido de carbono emitido pela queima do carvão fóssil, no Brasil, propondo uma metodologia para o cálculo de emissões de CO₂, a partir dos coeficientes de emissão de carbono específicos para os carvões nacionais. Um levantamento do consumo dos carvões energéticos, pelos principais consumidores (termelétricas e indústrias), é apresentado para o ano de 2002, período mais recente para o qual se têm dados detalhados. Os resultados obtidos são comparados com a metodologia oficial brasileira (Brasil, 2002) e a eficiência do processo de queima utilizado é estimada para cada uma das usinas termelétricas estudadas.

2. Revisão

2.1 Estimativa dos parâmetros utilizados nos cálculos de emissão de carbono

Segundo as recomendações IPCC (2006), para a estimativa de emissão de carbono, a quantidade consumida de todos os combustíveis deve ser convertida de suas unidades originais (t, m³, kg, etc...) em unidade de energia (Terajoule). Para essa conversão, utilizam-se o Poder Calorífico Inferior (PCI) e a quantidade consumida (toneladas) do combustível, sendo que ambos devem estar expressos em base seca.

Deve-se utilizar o PCI porque esse parâmetro corresponde aos processos de troca térmica que, efetivamente, ocorrem durante a combustão, já que, na prática, os processos são realizados à pressão constante e a água é liberada no estado de vapor. Quando somente o Poder Calorífico Superior (PCS) for conhecido, o IPCC (2006) recomenda utilizar um fator de conversão para combustíveis sólidos como o carvão (PCI = 0,95 x PCS). Segundo Pires (2004), para os carvões nacionais, a conversão

sugerida pelo IPCC pode trazer erros significativos. Esse autor sugeriu a utilização da seguinte expressão empírica para a estimativa do PCI, a partir dos valores de PCS:

$$PCI = 0,977 \times PCS - 0,22 \quad (1)$$

A relação dada pela equação (1) foi obtida de maneira experimental levando em consideração os diferentes tipos de carvão (95 amostras estudadas), o que torna os cálculos de emissão mais próximos do real.

Na metodologia adotada no inventário brasileiro de emissões do MCT (Brasil, 2002), os cálculos foram realizados utilizando valores de consumo de carvão em base úmida. Essa simplificação pode ocasionar erros significativos, pois o carvão utilizado para fins energéticos possui teores de umidade variados, podendo chegar a 20% (Müller et al., 1987). Portanto, para a realização dos cálculos de emissão, é necessária a conversão do consumo de carvão em base úmida (bu) para base seca (bs), conversão que pode ser facilmente realizada, desde que conhecido o teor de umidade da amostra.

2.2 Fator de emissão de carbono

As estimativas de emissão de dióxido de carbono pela queima de carvão, geralmente, são expressas a partir de Fatores de Emissão de Carbono (*Carbon Emission Factors* - CEF). Os CEFs representam a quantidade de CO₂ emitida por unidade de massa de carvão queimado ou por quantidade de energia utilizada ou gerada por essa queima (Pires, 2004). No inventário nacional, os cálculos de emissão foram realizados utilizando o CEF fixo igual a 25,8 tC.TJ⁻¹, valor médio recomendado pelo IPCC (2006) para carvões sub-betuminosos, quando não são conhecidos os valores específicos para os carvões utilizados. Nesse trabalho, são utilizados os CEFs calculados experimentalmente no trabalho de Pires (2004) para os principais carvões energéticos nacionais, que estão contidos na Tabela 1.

Além dos CEFs, a Tabela 1 apresenta dados de caracterização dos carvões nacionais, como os teores de umidade e carbono, bem como o poder calorífico inferior (PCI) e superior (PCS). O carvão é classificado de acordo com o tipo de utilização e PCS (Muller et. al., 1987). O teor de cinzas é, também, apresentado como parâmetro auxiliar de verificação da qualidade dos carvões nacionais. Quanto maior o teor de cinzas menores o teor de carbono e o poder calorífico do combustível. Portanto maiores quantidade de carvão de baixa qualidade devem ser utilizadas para gerar a mesma quantidade de energia, o que, também, afeta a eficiência da combustão e assim por diante.

No processo de queima, existe uma fração de carvão que não é oxidada. O IPCC (2000) indica que a fração oxidada é de, aproximadamente, 98%. Esse valor médio proposto, certamente, não deve ser atingido por usinas termelétricas de tecnologia defasada ou que utilizam

carvões de baixa qualidade, como é o caso de algumas termelétricas brasileiras. Entretanto, como ainda não existem muitos estudos para a determinação experimental desse valor, esse trabalho adota a recomendação do IPCC (2000).

3. Materiais e métodos

O procedimento geral de cálculo seguiu a metodologia indicada para a construção de inventários nacionais dos gases responsáveis pelo efeito estufa recomendado pelo IPCC (2006). A aplicação da metodologia proposta é feita com dados referentes ao ano de 2002.

O cálculo de emissão de carbono (equação 2), expresso em Giga gramas de Carbono por ano (Gg C. ano⁻¹), é realizado pelo produto entre a energia contida no combustível consumido em um determinado ano (calculado pela equação 3 em TJ.ano⁻¹), o coeficiente de emissão de carbono (CEF em tC.TJ⁻¹) específico, para cada tipo de carvão, e a fração oxidada (ϕ), que equivale a 0,98 para a combustão de carvões (IPCC, 2000). O fator 1000 converte tC para GgC e, para expressar os resultados, em CO₂, ao invés de carbono (C), realiza-se, apenas, a conversão por meio das massas atômica e molecular respectivas (CO₂/C 44/12).

$$\text{Emissão}_{(\text{GgC.ano}^{-1})} = \frac{\text{CEF}_{(\text{tC.TJ}^{-1})} \cdot E_{\text{Carvão}(\text{TJ.ano}^{-1})}}{10^3} \cdot \phi \quad (2)$$

$$E_{\text{Carvão}(\text{TJ.ano}^{-1})} = \frac{\text{Consumo}(\text{t.ano}^{-1}) \cdot 10^3 \cdot \text{PCI}(\text{MJ.kg}^{-1})}{10^6} \quad (3)$$

Tabela 1 - Dados de caracterização dos principais carvões energéticos brasileiros conforme diferentes fontes de informação.

Carvão ¹	Cinzas (%, bs)	Umidade (%)		C ² (%,bs)	PCS ³ (kcal.kg ⁻¹ , bs)			PCI ³ (kcal.kg ⁻¹ , bs)		CEF ⁴ (tC.TJ ⁻¹)	
		A	B		A	C	B	D	B	E	B
Fonte	A	A	B	B	A	C	B	D	B	E	B
CE3100	57	15	14,12	34,5	2.950	3.100	3.074	2.945	3.003	25,8	25,32
CE3300	54	17	15,89	37,6	3.150	3.300	3.096	3.135	3.025	25,8	25,07
CE3700	47	15	14	36,4	3.700	3.700	3.750	3.515	3.664	25,8	25,32
CE4200	40	19	15	45,5	4.200	4.200	3.960	3.990	3.869	25,8	24,73
CE4500	43	10	7,06	47,1	4.500	4.500	4.600	4.275	4.494	25,8	24,65
CE4700	35	19	n.d.	49,6	4.700	4.700	4.186	4.465	4.090	25,8	24,59
CE5200	35	10	4	53,7	5.200	5.200	5.249	4.940	5.128	25,8	24,59
CE5900	22	20	n.d. ⁵	n.d.	5.900	n.d.	5.996	5.600	5.935	25,8	24,41
CE6000	25	15	n.d.	61,6	5.700	6.000	6.075	5.700	5.935	25,8	24,22

Carvão¹ - Classificado de acordo com o tipo, Carvão e Energético (CE) juntamente com o seu poder calorífico superior teórico; C² - teor de carbono orgânico elementar; PCS e PCI³ - Poder calorífico superior e inferior, respectivamente; CEF⁴ - Coeficientes de emissão de carbono; n.d.⁵- não disponível. Fonte: A: Muller et al. (1987); B: Pires (2004); C: Brasil (2003); D: Brasil (2006); E: Brasil (2002).

Na equação 3, a energia contida em cada tipo de carvão é obtida pela multiplicação da quantidade consumida de carvão por ano, expressa em base seca em toneladas e convertida a kg pelo fator 1000, pelo seu poder calorífico inferior (PCI, convertido de kcal.kg⁻¹ para MJ.kg⁻¹, multiplicando o valor original pelo fator 0,004186). A quantidade de energia calculada, em MJ, é, então, convertida a TJ, dividindo-se pelo fator 10⁶.

3.1 Cálculos específicos para termelétricas

As emissões de CO₂ gerados em termelétricas estão relacionadas, não somente com a emissão pela queima do carvão, mas, também, pela queima de combustíveis secundários, como óleos combustíveis e diesel utilizados para iniciar e sustentar o processo de queima. A energia que entra no sistema é determinada pela relação direta entre o consumo de combustível e seu poder calorífico inferior. Quando se refere ao carvão, o consumo deve ser utilizado em base seca. Já o óleo combustível e o óleo diesel não possuem variações significativas em sua composição, não contendo teores significativos de umidade.

A energia total no sistema é obtida pela soma das entradas individuais de energia dos combustíveis utilizados (equação 4). As quantidades de energia que entram no sistema de queima, a partir do óleo diesel e do óleo combustível, são calculadas pelas equações 5 e 6, respectivamente. Nessas equações, a quantidade consumida por ano de cada combustível é multiplicada pelo seu poder calorífico inferior. Os PCI do óleo combustível e do diesel são 9.874 e 10.149 kcal.kg⁻¹, respectivamente, devem ser convertidos em unidades adequadas (diesel 42,49 MJ.kg⁻¹, óleo combustível 41,34 MJ.kg⁻¹). Como o consumo de óleo diesel é obtido em litros (L), utiliza-se a densidade média desse óleo (0,852 kg.L⁻¹) para converter os dados para unidade de massa (kg). Como no caso da equação 3, o fator 10⁶ é utilizado para converter as energias obtidas de MJ para TJ.

$$\text{Entrada de energia}_{(\text{Total})} = \sum (E_{\text{Carvão}} + E_{\text{Diesel}} + E_{\text{Óleo}}) \quad (4)$$

$$E_{\text{Diesel(TJ.ano}^{-1})} = \frac{\text{Consumo(L.ano}^{-1}) \cdot 0,852(\text{kg.L}^{-1}) \cdot 42,49(\text{MJ.kg}^{-1})}{10^6} \quad (5)$$

$$E_{\text{Óleo(TJ.ano}^{-1})} = \frac{\text{Consumo(t.ano}^{-1}) \cdot 10^3 \cdot 41,34(\text{MJ.kg}^{-1})}{10^6} \quad (6)$$

O cálculo de emissões de carbono, para as termelétricas (Gg C.ano⁻¹), é obtido pelo somatório das emissões de cada combustível utilizado. As emissões advindas da queima do diesel e do óleo combustível são obtidas de maneira similar à do carvão, conforme descrito pela Equação 2. No entanto, como as propriedades dos óleos não sofrem grandes variações, são utilizados, para o cálculo de emissões, os valores dos CEFs indicados pelo IPCC (2006), correspondendo a 21,1 e 20,2 tC.TJ⁻¹, para o óleo combustível e para o óleo diesel, respectivamente. A fração oxidada (φ), na reação de combustão, para ambos os óleos, corresponde a 99% (IPCC, 2006).

Para relacionar a energia que entra no sistema com a energia que sai, é necessário realizar a conversão da energia de Terajoule para Megawatt-hora (MWh). Para isto, foi utilizada a relação adotada internacionalmente, que indica 1 kWh, correspondendo a 860 cal. Essa conversão, também, é utilizada no Balanço Energético Nacional desde 2003 (Brasil, 2006).

A eficiência global das usinas termelétricas é um parâmetro importante, que está diretamente relacionado com a quantidade de combustível queimada em relação à quantidade de energia gerada. A eficiência dessas usinas, em termos de emissão de carbono, pode ser avaliada por meio de um fator de emissão de carbono como, por exemplo, a quantidade de CO₂ emitida no processo de combustão em relação à energia gerada. No presente estudo, é utilizado um fator de emissão calculado de acordo com a Equação 7, utilizando-se dados de geração de energia de cada usina termelétrica obtidos junto à Eletrobrás (Brasil, 2007).

$$\text{Fator emissão} = \frac{\text{Emissão total de C (Gg.C.ano}^{-1})}{\text{Energia gerada (M.Wh.ano}^{-1})} \quad (7)$$

4. Resultados e discussões

A Tabela 2 exibe o consumo de carvão energético em base úmida e seca, a entrada total de energia (carvão, óleos diesel e combustível) e a emissão de carbono pelas termelétricas, apresentando, também, as fontes industriais no Brasil, que utilizaram carvão como combustível primário no ano de 2002. Observa-se que foram emitidos 1.794 GgC.ano⁻¹, sendo que, desse total, 86% são decorrentes das usinas termelétricas. O restante (256 GgC.ano⁻¹) foi emitido através de processos industriais, com destaque para o setor petroquímico e de celulose no Estado do RS.

Destacam-se as emissões do Complexo Jorge Lacerda, localizado próximo à cidade de Tubarão, em Santa Catarina, que, sozinho, contribui com 52% das emissões brasileiras desse setor. Esse

percentual elevado era esperado, pois o Complexo Jorge Lacerda é, atualmente, o maior complexo termelétrico a carvão da América Latina, totalizando 857 MW de capacidade instalada. A usina termelétrica de Candiota destaca-se como a segunda maior fonte, com 25% do total de emissões. Essa contribuição deve-se, não só às quantidades significativas consumidas (1.385.936 t.ano⁻¹) de carvão de baixo poder calorífico (CE3300), mas, também, ao volume significativo de diesel e óleo combustível usado. Candiota é a usina que apresenta o maior percentual de emissão (4,2% da entrada de energia) da mistura de combustíveis).

A usina da cidade de Figueira, no Paraná, é a termelétrica que possui o menor percentual de emissões, 1% do total. Isto ocorre devido à pequena capacidade de geração (20 MW) e da utilização de um carvão de melhor qualidade (CE6000), com maior poder calorífico e baixo percentual de umidade. As outras

duas usinas gaúchas (Charqueadas e São Jerônimo) emitem, juntas, os restantes 7% do carbono lançado à atmosfera.

Através dos dados da Tabela 2, também observa-se que ocorrem, em determinados casos, diferenças significativas nos resultados de emissão entre a metodologia proposta e a metodologia oficial (Brasil, 2002). A maior diferença verificada nas emissões de 2002 (-33%) corresponde aos cálculos para a termelétrica de São Jerônimo (RS). Os valores superestimados pela metodologia do 1º inventário devem-se a diversos fatores. Entre eles cabe destacar a inclusão dos combustíveis secundários e o teor de umidade do carvão na metodologia proposta, os quais não foram considerados na metodologia oficial. Como algumas usinas não utilizam apenas o carvão na combustão, mas, também, os óleos combustível e diesel para gerar energia, isto pode acarretar erros significativos.

Tabela 2 - Emissão de carbono pela queima de carvão como combustível primário em 2002 no Brasil.

Fontes Emissoras		Consumo de Carvão (t.ano ⁻¹)	Entrada de Energia ²		Emissão Carbono		
Nome	Potência (MW)		TJ (PCI)	(%) carvão	Metodologia Proposta		Metodologia Oficial ³ (Gg C.ano ⁻¹)
					(Gg C.ano ⁻¹)	(%)	
Candiota	446	1.385.936	18.326	95,8	447	25	576
Termochar	72	313.139	3.964	99,3	98	5	120
São Jerônimo	20	69.335	1.123	100	27	2	36
Jorge Lacerda¹	857	2.058.405	38.925	99,6	940	52	1.055
UTLA	232	546.434	10.416	98,9	251	15	280
ULTB	262	908.009	17.152	99,8	414	25	466
UTLC	363	603.961	11.375	100	275	17	310
Figueira	20	43.809	1.092	100	26	1	33
Térmicas	1415	3.870.624	63.430	94,7	1.538	86	1.819
Outros⁴		563.120	10.407	100,0	256	14	325
Total		4.433.745	73.837	98,6	1.794	100	2.144

1 - O complexo Jorge Lacerda é constituído por três sistemas geradores (UTLA, ULTB e UTLC); 2 - Corresponde ao somatório da energia fornecida por todos os combustíveis utilizados (carvão+óleo combustível+diesel); 3 - Estimativa efetuada seguindo a metodologia utilizada no 1º Inventário (2002); 4 - somatório das emissões de outras fontes industriais, calculadas por tipo de carvão energético consumido.

Conforme citado anteriormente, a usina de Candiota utiliza, no processo de queima, 95,8% de carvão, sendo o restante constituído de combustíveis secundários. Pela metodologia proposta, caso não fossem considerados os combustíveis secundários, a diferença entre os valores encontrados e os da metodologia oficial seria em torno de -34%. Esses valores estão acima das imprecisões dos dados brutos (quantidades e composição dos combustíveis, fatores de emissão, etc...) utilizados. Os erros, então, surgidos a partir da utilização da metodologia do 1º inventário, podem ser atribuídos, principalmente, à desconsideração do teor de umidade do carvão, ao uso de CEFs genéricos (valores médios para carvões sub-betuminosos estrangeiros) e aos valores de PCI calculados de forma pouco precisa e baseados em PCS bastante diferentes dos valores experimentais (Pires, 2004).

A relação entre a emissão de carbono (expressa em tCO_2 por MWh de energia produzida) e a eficiência energética dos processos de combustão das usinas termelétricas brasileiras, a partir de metodologias propostas por esse trabalho e da literatura (IPCC, 2007), pode ser verificada na Figura 1. Essa figura representa a sobreposição de dois gráficos, onde as colunas representam a emissão de carbono como fator de emissão, em toneladas de CO_2 por Megawatt-hora de energia produzida, e os triângulos indicam a eficiência de combustão em percentual. O dado de literatura é baseado em fatores de emissão de CO_2 para o sistema interligado Sul-Sudeste-Centro-Oeste, estimados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2004) e publicados pelo IPCC (2007). Esses dados são utilizados por empresas nacionais, visando à participação em projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

A partir da Figura 1, pode-se, também, verificar que a eficiência média das usinas termelétricas brasileiras, para o ano de 2002, é de 29%, valor similar ao publicado pelo estudo realizado pela *International Energy Agency* (IEA, 2008). No estudo da IEA,

o Brasil ocupa o 34º lugar em um *rank* de eficiência da produção de energia através da combustão de carvão, sendo mais eficiente apenas que a Índia (27%). Segundo o estudo, a Dinamarca possui a maior eficiência neste tipo de combustão (43%), seguida pelo Japão (42%). Essa diferença de eficiência entre as usinas térmicas brasileiras para os demais países pode estar relacionada com o tempo de funcionamento e o tipo de tecnologia utilizada pelas termelétricas brasileiras a carvão. Por exemplo, as usinas Termochar e de São Jerônimo iniciaram suas atividades na década de 50 (JICA, 1997) e possuem tecnologias de combustão defasadas em relação às termelétricas mais atuais.

Comparando as metodologias utilizadas para projetos de MDL e a utilizada nesse trabalho, é possível verificar que a quantidade de emissão é distinta para a maioria das usinas térmicas, sendo similares apenas nas usinas de Candiota e da Termochar, no Rio Grande do Sul. Nas usinas de São Jerônimo e Figueira, a quantidade de carbono foi maior pelos cálculos desse trabalho enquanto, para o Complexo Jorge Lacerda foi inferior. As discrepâncias devem ter ocorrido pelo uso indevido de coeficientes de emissão

não apropriados aos carvões nacionais no trabalho de literatura (ONS, 2004).

Quanto à eficiência energética, o complexo Jorge Lacerda apresentou os melhores resultados com as maiores eficiências (37%), que foram calculadas para a Unidade C do referido complexo, sendo esta a última unidade construída e que apresenta processos e controles mais modernos. Na média (32%), as quatro unidades do complexo ainda estão aquém das usinas estrangeiras mais eficientes (>40%). Porém a diferença, no que diz respeito às usinas nacionais de pior desempenho, é significativa. A usina de São Jerônimo possui uma eficiência inferior a 15%, e seu fator de emissão corresponde a $2,171 \text{ tCO}_2 \cdot \text{MWh}^{-1}$, maior fator de emissão de carbono entre as usinas brasileiras. A segunda usina com menor eficiência, consequentemente com um fator de emissão alto, é a usina da Figueira, que tem sua eficiência em torno de 19%, sendo que seu fator de emissão é $1,670 \text{ tCO}_2 \cdot \text{MWh}^{-1}$. Já a usina de Candiota, possui uma eficiência média de 25,3%, sendo que suas emissões estão em torno de $1,277 \text{ tCO}_2 \cdot \text{MWh}^{-1}$. Charqueadas apresenta eficiência e

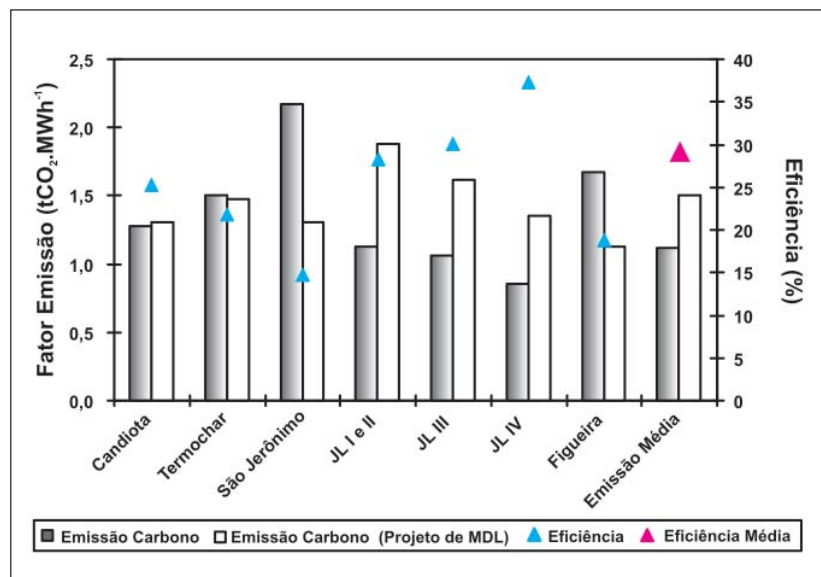


Figura 1 - Fator de emissão de carbono (em tCO_2 por MWh de energia gerada) e a eficiência (%) na geração de energia das usinas termelétricas brasileiras a carvão em 2002.

emissões intermediárias (22% e 1,502 tCO₂.MWh⁻¹). De maneira geral, esses resultados indicam que as usinas mais eficientes são aquelas que utilizam tecnologia mais moderna e carvão de melhor qualidade.

5. Conclusões

A combustão de carvão, para a geração de energia, é uma atividade potencialmente emissora de carbono para a atmosfera.

Para o ano de 2002, as emissões atmosféricas de carbono calculadas pela metodologia proposta por esse trabalho foram de 1.794 Gg C.ano⁻¹ para o ano de 2002, enquanto a calculada utilizando a metodologia oficial dos inventários de emissão brasileiros, para o mesmo ano, foi de 2.144 Gg C.ano⁻¹. Essa diferença (aproximadamente 20%) é significativa e deve-se, principalmente, à não-utilização de critérios mais específicos do carvão brasileiro para o cálculo de emissões pela metodologia oficial.

As emissões calculadas, nesse trabalho, também apresentaram diferença da metodologia adotada em projetos de MDL, que segue as orientações do IPCC. Essas diferenças mostram que tais arredondamentos podem causar alterações na linha de base de projetos de MDL. Para saber o quanto é necessário reduzir a emissão, para se chegar a limites mínimos de CO₂ emitidos, deveriam ser adotadas metodologias mais precisas para os cálculos de emissões.

A partir da eficiência de combustão calculada, constata-se que as usinas tér-

micas brasileiras, em sua maioria, são muito antigas e com tecnologias de queima ineficientes. Modernizar os sistemas de combustão, para que seja possível aumentar a eficiência do processo, com a conseqüente redução das emissões de CO₂ e outros poluentes, é uma alternativa para manter de forma sustentável o uso de carvão fóssil no país.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à PUCRS pelo apoio financeiro.

7. Referências bibliográficas

- BRASIL. Eletrobras [2007]. Disponível em: <http://www.eletrobras.gov.br>. Acesso em: 15 mar. 2007.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação - COPPE. *First Brazilian Inventory of Anthropogenic Greenhouse gas emissions: Carbon Dioxide emissions from fuel burning: Top-Down Approach*. Rio de Janeiro: 2002. 168p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Balanco Energético Nacional 2003: Ano base 2002*. Brasília: 2003. 168 p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. *Balanco Energético Nacional 2006: Ano base 2005*. Rio de Janeiro: 2006. 188 p.
- IEA - International Energy Agency, Energy Efficiency Indicators for Public Electricity Production from Fossil Fuels, IEA/OECD, Paris. 2008.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, Clean Development Mechanism, *Emission factor for the Brazilian South-Southeast-Midwest interconnected grid*. <http://cdm.unfccc.int/>. Acesso em 15 mar. 2007.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, World Meteorological Organization*, May, 2006.
- JICA - JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (Japão). *The Study on Evaluation of Environmental Quality in Regions under Influence of Coal Steam Power Plants in the Federal Republic of Brazil: Final Report*. Tokyo: 1997.
- MÜLLER, A. A. et alii. *Perfil analítico do carvão*. (2. ed.). Porto Alegre: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 1987. 180p.
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. Centro Nacional de Operação do Sistema. *Acompanhamento Diário da Operação do SIN*, www.ons.gov.br. Acessado em 16 out. 2009.
- PIRES, Marçal. *Estimativa dos coeficientes de emissão de carbono para o carvão mineral brasileiro*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 10. Rio de Janeiro: 2004. p. 239-247.
- XAVIER, E. E. *Termeletricidade no Brasil - Proposta metodológica para inventário das emissões aéreas e sua aplicação para o caso do CO₂*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004. 335p. (Tese de Doutorado em Ciências em Planejamento Energético - Pós-Graduação em Engenharia).

Artigo recebido em 03/10/2008 e aprovado em 04/11/2009.

A REM tem novo endereço:
FUNDAÇÃO GORCEIX - REM
Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57 - Vila Itacolomy
35400-000 - Ouro Preto - MG
(31) 3551-4730 (31) 3559-7408
www.rem.com.br