

## Avaliação das Emissões de Gases de Efeito Estufa Derivadas de Reservatórios de Usinas Hidrelétricas em Minas Gerais

Vinícius Verna Magalhães Ferreira

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN/UFMG

Belo Horizonte - MG - vvmf@cdtn.br

Carlos Barreira Martinez, Bruno Rabelo Versiani

Centro de Pesquisas Hidráulicas CPH – EHR/UFMG

Belo Horizonte - MG - martinez@cce.ufmg.br – versiani@ehr.ufmg.br

Recebido: 31/03/05 revisado: 29/11/05 aceito: 07/04/07

---

### RESUMO

*A construção e operação de usinas hidrelétricas gera inúmeros impactos ambientais, alguns deles denominados externalidades negativas, cujos custos não são repassados aos consumidores e são pagos pela sociedade como um todo. As emissões de gases de efeito estufa, que contribuem para o aquecimento global, enquadram-se no conceito de externalidades negativas.*

*Este trabalho apresenta uma metodologia para se calcular o valor das externalidades associadas às emissões de gases de efeito estufa de algumas usinas hidrelétricas situadas no Estado de Minas Gerais, utilizando dados georeferenciados da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, e informações técnicas e econômicas disponibilizadas pelo setor elétrico.*

**Palavras-chave:** externalidades, gases de efeito estufa, hidrelétricas, reservatórios.

---

### INTRODUÇÃO

Os novos projetos cotejados pelo setor elétrico têm contemplado cada vez mais a análise das emissões de gases de efeito estufa. Rosa (1996), estabelece um critério para decisão sobre aproveitamentos hidrelétricos na Amazônia, comparando a emissão de metano e dióxido de carbono, pela decomposição da biomassa, inundada pelo enchimento do reservatório, com a emissão de uma termelétrica equivalente. Os resultados mostram que, na grande maioria das situações analisadas, a emissão de carbono evitada pela hidrelétrica é grande. Nesse trabalho são apresentados estudos de sensibilidade que dizem respeito à tecnologia de geração térmica e a densidade de potência da hidrelétrica, que pode variar desde 0,1 W/m<sup>2</sup> em Balbina até cerca de 10 W/m<sup>2</sup> em Belo Monte. Uma das conclusões apresentadas no trabalho diz que o lago de Balbina tem um impacto no aquecimento global 26 vezes maior do que as emissões de uma usina termelétrica equivalente.

Embora este problema possa ser mitigado com a retirada da vegetação das áreas a serem submersas, este processo é raramente efetuado devido aos custos adicionais envolvidos. A ELETRONORTE

limpou menos de um quinto dos 2.250 km<sup>2</sup> da floresta tropical inundada pelo reservatório de Tucuruí, e apenas 2% dos 3.150 km<sup>2</sup> para a barragem de Balbina, apesar da legislação Brasileira ordenar a limpeza total da área a ser submersa (McCully, 1996).

Este trabalho apresenta uma metodologia para se calcular o valor das externalidades associadas às emissões de gases de efeito estufa de algumas usinas hidrelétricas situadas no Estado de Minas Gerais, utilizando dados georeferenciados da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, e informações técnicas e econômicas disponibilizadas pelo setor elétrico.

### OS GASES DE EFEITO ESTUFA

As questões relativas aos gases de efeito estufa foram discutidas no Workshop Internacional sobre Reservatórios Hidrelétricos, Lagos e Emissões de Gases de Efeito Estufa, realizado no Rio de Janeiro em dezembro de 1998.

O relatório OECD/OCDE "Estimation of Greenhouse Gas Emissions and Sinks" (OECD, 1991), dedicou um capítulo especial para as alterações do uso do solo e florestas como fontes de emis-

são de gases, onde considera a inundação de áreas como uma das atividades potenciais de emissão de  $\text{CH}_4$ . Esta questão também é abordada no documento da FBDS - Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, intitulado “Avaliação das Emissões de Gases de Efeito Estufa devido as Mudanças nos Estoques de Florestas Plantadas”, (FBDS, 2004).

A AIEA – Agência Internacional de Energia Atômica, em outubro de 1994, promoveu na China um evento denominado “Comparison of energy sources in terms of their full-energy-chain emission factors of greenhouse gases” (AIEA, 1994), no qual pesquisadores de vários países do mundo apresentaram estudos relativos às emissões de gases de efeito estufa em seus países.

O laboratório nacional de Oak Ridge efetuou um estudo para o Departamento de Energia dos Estados Unidos e para a Comissão Européia. O documento final, cujo nome é “Estimating Externalities of Hydro Fuel Cycles”, foi publicado em 1994, e além das questões relativas às emissões, aborda também inúmeras outras externalidades decorrentes da construção e operação de usinas hidrelétricas (Oak Ridge National Laboratory, 1994).

Donnes e Gantner (1996) apresentaram uma estimativa das emissões de metano nos lagos suíços. Segundo os pesquisadores, a superfície total dos lagos no país é de 7.000 hectares, e o total anual de emissões é da ordem de 280 toneladas de  $\text{CH}_4$ , o que correspondia a 2% do total das emissões do setor energético, que era de 14 mil toneladas. Os resultados mostram que 80% das emissões de gases de efeito estufa na Suíça são associadas aos materiais utilizados na construção das represas e das usinas, como cimento e aço, enquanto a geração direta nos reservatórios pode ser considerada de pequena significância. O trabalho também aborda as emissões de óxido nitroso- $\text{N}_2\text{O}$ , geralmente desconsideradas em estudos similares.

O processo de decomposição da vegetação submersa rapidamente depleciona o nível de oxigênio na água, geralmente exterminando boa parte da vida aquática. Acredita-se que o consumo de oxigênio pela vegetação submersa em um reservatório recém construído próximo a usina de Yaciretá, na fronteira Argentina/Paraguai, tenha matado 120 mil peixes, que foram encontrados a jusante depois do primeiro teste das turbinas, em agosto de 1994 (Murphy, 2001).

Há duas formas de produção de gases de efeito estufa em uma usina hidrelétrica: por difusão ou por bolhas. O primeiro caso ocorre na superfície do reservatório. Por ser um meio aeróbio, com mai-

or presença de oxigênio, as bactérias decompõem a matéria orgânica e emitem gás carbônico, que se difunde pela água. Já o metano resulta da decomposição de matéria orgânica no fundo dos lagos das usinas, onde a presença de oxigênio é nula ou muito pequena. Como não se dilui na água, esse metano chega à superfície por meio de bolhas. Em reservatórios com grande profundidade, acima de 40 metros, o metano não consegue subir à superfície. Lagos profundos em áreas pequenas e com grande potência energética emitem pouco gases deste tipo. Lagos rasos, em áreas extensas, e com pouca densidade de potência, são grande poluidores.

Três fatores são responsáveis pela produção desses gases em uma hidrelétrica: a decomposição da vegetação preexistente, a ação de algas primárias que emitem  $\text{CO}_2$  nos lagos das usinas; e o acúmulo nas barragens de nutrientes orgânicos trazidos pelos rios e pela chuva. A produção de metano ocorre em diferentes ambientes naturais tais como pântanos, solo, sedimentos de rios, lagos e mares, e nos órgãos digestivos de animais ruminantes (Fundamentos da Digestão Anaeróbia, 2004).

Em reservatórios, as emissões estão relacionadas a uma série de fatores, tais como a quantidade de biomassa inundada. Em algumas usinas as emissões de gases de efeito estufa são bastante significativas. Na usina de Porto Primavera esse valor chegou a 2491 ton./dia, em Tucuruí, 6311 ton./dia, em Balbina, 6763 ton./dia e em Sobradinho, 7070 ton./dia (Santos, 2000).

## CONVENÇÃO SOBRE A MUDANÇA DO CLIMA

Realizada em 1992 no Rio de Janeiro, a ECO92 reuniu 150 países que assinaram naquela data (mais 25 países o fizeram posteriormente) a Convenção Quadro sobre Mudança do Clima (United Nation Framework on Climate Change - UNFCC). Esta convenção passou a ser válida em de 21 de março de 1994. A partir de fevereiro de 1995, a autoridade máxima da Convenção passou a ser a Conferência das Partes – COP, estabelecida pelo Artigo 7 da UNFCC, onde as “Partes” são os países signatários da Convenção.

A Convenção sobre Mudança do Clima enfoca o problema de como as ações antrópicas afetam a forma na qual a energia solar interage com a atmosfera e escapa dela. Esta alteração, na forma de interação entre a energia solar e a atmosfera, embora ainda muita discutida, resulta de uma mudança na concentração de certos gases chamados de gases

de efeito estufa, conhecidos também como GHG – GreenHouse Gases. Isto se aplica, principalmente, aos gases dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), e provoca o aumento da temperatura no globo terrestre e outros efeitos decorrentes deste.

A primeira sessão da Conferência das Partes ocorreu em 1995, na cidade de Berlim, sendo que, nos dois anos seguintes, as reuniões ocorreram em Genebra e Kyoto, onde estabeleceu-se o Protocolo de Kyoto em dezembro de 1997. As discussões anuais prosseguiram em Buenos Aires, Bonn e Haia. A grande expectativa depositada na reunião de Haia para uma imediata ratificação do Protocolo de Kyoto e o conseqüente início do mercado de créditos de carbono foi frustrada devido ao impasse entre negociadores de governos europeus e norte americanos. Encontros posteriores aconteceram em Bonn, Marakesh, Nova Delhi e Milão, em dezembro de 2003 (MCT, 2004).

Todavia, as dificuldades políticas para a implementação do Protocolo fizeram com que somente uma pequena parcela de seus signatários tenham ratificado até o final do ano de 1999. Os esforços para a real implementação do Protocolo de Kyoto têm sido evitados pelos países maiores emissores sob a alegação de que o aquecimento global pode ser resultado de uma variação natural do clima.

Tendo em vista que os custos de redução de emissões nos países listados Anexo I da Convenção sobre a Mudança do Clima (relação de nações que suportam o compromisso de redução de emissões de GHG) serão, provavelmente, maiores que os custos de projetos nos países em desenvolvimento, e que os benefícios da redução beneficiam o planeta independentemente de onde forem implementados, o Artigo 12 do Protocolo de Kyoto abriu essa possibilidade como um mecanismo de flexibilização do acordo. O Anexo B, parte integrante do Protocolo de Kyoto, discrimina as quantias de redução para cada país do Anexo I.

Desta forma, as reduções resultantes de projetos implementados nos países em desenvolvimento, mais precisamente nos países não constantes do Anexo I, gerarão créditos que poderão ser apropriados pelos países dele integrantes para cumprimento de suas metas de redução na emissão de GHG. Este mecanismo de flexibilização é conhecido como CDM - Clean Development Mechanism (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo).

Assim, a criação de uma “moeda” para transação dos créditos de CDM, o Certified Emissions Reductions (CERs) tornou-se, então, um atrativo a mais para direcionar o desenvolvimento sustentado

nos países em desenvolvimento, como objetivado pela Convenção (Junqueira, 2002).

## MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO

Um estudo preparado para o Banco Mundial indica que, em 2003, foi efetuado um número superior a 60 transações entre empresas, envolvendo cerca de 70 milhões de toneladas de carbono equivalente. Todavia, como os participantes não são obrigados a reportar essas transações, é possível que o tamanho desse mercado seja ainda maior. Além disso, transações internas de empresas do mesmo grupo não estão incluídas nas estatísticas desse estudo (CEBDS, 2003).

A União Européia anunciou que, mesmo sem a adesão da Rússia ao protocolo, iria continuar com a sua política de mudanças climáticas; todavia em novembro de 2004 a Rússia também ratificou sua adesão ao protocolo de Kyoto.

Iniciada em Abril de 2002, a United Kingdom Emissions Trading Scheme (UKETS) cria oportunidades para 6 mil empresas, dentro dos Acordos de Mudanças Climáticas. A Diretiva 2003/87/EC da Comunidade Européia (em vigor desde outubro de 2003) estabelece um “mercado de emissões de gases de efeito estufa” naquela Comunidade. A expectativa é de que essa ação gerará incentivos para a redução de emissões.

A Chicago Climate Exchange – CCX, é resultado da associação de 18 empresas americanas que se comprometeram a reduzir suas emissões de carbono em 4% nos próximos quatro anos. No Canadá, a IETA (International Emissions Trading Association) acertou os últimos detalhes com o Governo canadense para a criação e funcionamento de um mercado de emissões de gases de efeito estufa no país. O Prototype Carbon Fund – PCF, criado em 1999 por executivos do Banco Mundial, investe em projetos de redução de emissões, de acordo com o Protocolo de Kyoto, com o mecanismo de implementação conjunta (Joint Implementation – JI) e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

O Parlamento alemão determinou a redução das emissões anuais de dióxido de carbono das atuais 505 milhões de toneladas a 503 milhões de toneladas até 2007. A lei prevê que em 2012, na fase seguinte, as emissões do gás na Alemanha sejam reduzidas a 495 milhões de toneladas ao ano. Já no Brasil, os aterros sanitários da Nova Gerar e Vega, nas cidades de Nova Iguaçu (RJ) e Salvador (BA) já receberam a validação da empresa norueguesa DNV (Det Norske Veritas), com atuação no Brasil há 30 anos, e primeira credenciada pelas Nações Unidas

para verificação de projetos dentro das diretrizes do MDL. A partir da implementação dos projetos, seus resultados serão avaliados e poderão transformar-se em créditos de carbono para comércio no mercado internacional.

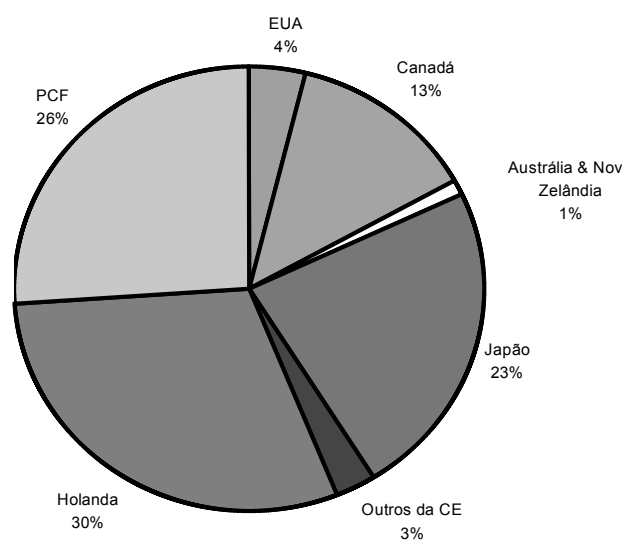
Nas transações realizadas em 2003, os valores dos créditos de carbono variaram entre 4 e 6 dólares americanos por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente, de acordo o estudo preparado para o Banco Mundial. Segundo uma pesquisa anual preparada pela IETA, junto à companhias multinacionais, a expectativa para o ano de 2010 é de que os valores médios sejam da ordem de 14,3 dólares americanos. A Tabela 1 apresenta alguns projetos financiados pelo PCF.

**Tabela 1 – Projetos financiados pelo Prototype Carbon Fund**

País	Projeto
Brasil	Plantar Project
Bulgária	Svilosa Biomass Project
Chile	Chacabuquito Renewable Energy Project
Costa Rica	Chorotega Sub-Project; Cote Hydroelectric Sub-Project
Colômbia	Jepirachi Wind Power Project at Alta Guajira
Guatemala	El Canada Hydro Project
Hungria	Pannonpower Pécs Fuel Conversion Project
Lituânia	Liepaja Solid Waste Management Project
Moldávia	Soil Conservation Project
Romênia	Romania-Afforestation Project
Uganda	West Nile Hydropower Project

Fonte: <http://prototypecarbonfund.org>

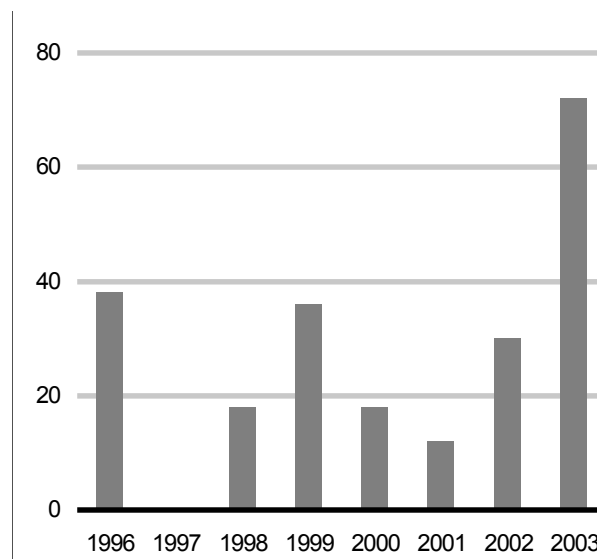
Em 2003, os maiores compradores do mercado de carbono foram o Governo Holandês e o PCF, mantendo praticamente a mesma participação do ano anterior (Figura 1). Empresas privadas japonesas, também contribuíram significativamente para o aumento das transações no ano de 2003. Já nos Estados Unidos, a diminuição da participação em relação ao percentual do ano anterior deveu-se principalmente à falta de apoio do governo ao tema (Prototype Carbon Fund, 2004).



**Figura 1 – Participação na aquisição de reduções de emissões em 2003**

Fonte: Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável - CEBDS

A quantidade de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente negociadas ao longo deste ano mais do que dobrou em relação ao ano de 2002 (Figura 2).



**Figura 2 – Reduções de emissões comercializadas por ano (em milhões de tCO<sub>2</sub>e)**

Fonte: CEBDS

Tabela 2 – Emissões de gases de efeito estufa de alguns aproveitamentos da CEMIG

Aproveitamento	Localização	Emissões de CO <sub>2</sub> - ton/km <sup>2</sup> -ano	Emissões de CH <sub>4</sub> - ton/km <sup>2</sup> -ano	Emissão total de carbono – ton./dia	Potência instalada MW
Camargos	Rio Grande	1420,215	8,03	81,90	46,00
Emborcação	Rio Paranaíba	415,37	71,54	208,23	1192,00
Itutinga	Rio Grande	1420,215	8,03	1,77	52,00
Miranda	Rio Araguari	1601,62	56,21	66,39	408,0
Nova Ponte	Rio Araguari	1601,62	56,21	585,96	510,00
Piau	Rio Pinho	1420,215	8,03	0,54	18,01
Salto Grande	Rio Santo Antônio	1420,215	8,03	7,61	102,00
Três Marias	Rio São Francisco	415,37	71,54	522,27	396,00

(Fonte: Adaptado de Santos, 2000)

Diante de tantas oportunidades é de se esperar que um volume cada vez maior de créditos de carbono seja negociado, ainda mais se considerarmos que as quantidades negociadas no ano de 2003 não representam nem 1% das reduções de emissões previstas para 2010.

## METODOLOGIA

Santos (2000) concluiu que a intensidade de emissões de gases em um reservatório varia com o tempo, sendo esta variação modulada por um conjunto de influências, sendo as principais a temperatura, intensidade dos ventos, insolação, parâmetros físico-químicos da água, composição da biomassa alagada e latitude do aproveitamento.

Assim estabeleceu-se uma metodologia para contabilizar as emissões de gases de efeito estufa derivados de diferentes reservatórios brasileiros, e extrapolar estes valores encontrados para todo o parque hidrelétrico brasileiro. Foram quantificadas as emissões de metano e dióxido de carbono amostrados sob a forma de bolhas, que emanam do fundo do lago por efeito da decomposição de biomassa afogada, ou que são transportados verticalmente no gradiente do lago por difusão molecular, gerados a partir de material orgânico.

Ao multiplicar-se o valor total das emissões de carbono dos reservatórios pelo percentual do lago contido em cada um dos municípios, obtém-se o valor das emissões de carbono dos reservatórios por município. Esta metodologia admite que as emissões se distribuem de maneira homogênea em todo o lago (Equação 1).

$$EMC = (AAM/ATL) * ETL \quad (1)$$

onde:

EMC = Emissão de Carbono Municipal, em tonelada/dia;

AAM = Área Alagada do Município, em km<sup>2</sup>;

ATL = Área Total do Lago, em km<sup>2</sup>;

ETL = Emissão Total do Lago, em tonelada/dia.

A Tabela 2 apresenta alguns dados referentes a oito usinas hidrelétricas da CEMIG – Centrais Elétricas Minas Gerais (Santos, 2000). Estes reservatórios são representativos de diversas regiões do Estado de Minas Gerais e de vários tipos de usinas:

Com base em dados fornecidos pelo setor de geoprocessamento da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, que retratam a situação dos municípios mineiros que tem parte de suas terras alagadas pelos reservatórios acima citados, tornou-se possível discriminar qual a área alagada em cada um destes municípios. Ressalta-se aqui que uma significativa parcela do lago de Emborcação se encontra no Estado de Goiás. Os outros reservatórios estudados estão integralmente situados no Estado de Minas Gerais.

Um estudo realizado pela COPPE/UFRJ pondera que a expressiva emissão de metano em Três Marias, cujos valores destoam dos demais lagos, pode ser devida ao esvaziamento de cerca de 11 metros de cota do reservatório, o que possibilitou a revegetação de áreas marginais do lago. Isto ocasionou um incremento de biomassa, posteriormente alagada pelo enchimento do reservatório (Rosa et al., 1998).

Além disso, o desmatamento indiscriminado da bacia do Rio São Francisco, inclusive de trechos da mata ciliar, tem aumentado a quantidade de

sedimentos da calha do rio. A quantidade de sedimentos que é carregada para o leito do Rio São Francisco é maior do que sua capacidade de os transportar. Talvez este seja um dos motivos que explique a significativa taxa de emissões de metano no lago de Três Marias. (Andrade, 2002) afirma que o assoreamento na barragem de Três Marias é relevante nesse processo, (Hidrovia do São Francisco, 2004).

A Tabela 3 apresenta, como exemplo, a configuração associada a usina hidrelétrica de Três Marias, localizada no Rio São Francisco. Esta hidrelétrica alaga oito municípios, sendo que aproximadamente 45% do reservatório encontra-se na cidade de Morada Nova de Minas.

**Tabela 3 – Dados do lago de Três Marias**

UHE Três Marias	Área dos Municípios km <sup>2</sup>	Área municipal Alagada km <sup>2</sup>	Percentual do lago %	Área munic. não alagada km <sup>2</sup>
Abaeté	1816,85	74,07	6,67	1742,78
Biquinhas	457,22	1,22	0,11	456,00
Felixlândia	1553,35	157,90	14,21	1395,45
Morada Nova de Minas	2084,61	495,97	44,66	1588,63
Painceiras	637,75	54,64	4,92	583,10
Pompeu	2557,73	93,38	8,40	2464,34
São Gonçalo do Abaeté	2687,41	18,83	1,69	2668,57
Três Marias	2675,15	214,50	19,31	2460,65
Total	14470,09	1110,54	100,00	13359,54

Para as usinas em estudo, os valores das emissões de Miranda e Três Marias foram medidas “in situ”, enquanto que, para as outras, o valor foi obtido através de extrapolações matemáticas.

## SIGNIFICÂNCIA DAS EXTERNALIDADES

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos, de acordo com a metodologia aplicada. O preço da tonelada de carbono, de acordo com estimativas do Banco Mundial, varia de 5 a 15 dólares (Rocha, 2003). Optou-se por utilizar um valor conservativo neste trabalho e adotou-se o valor de 5 dólares a tonelada de carbono, de 2,36 reais cada dólar (cotação de 2001). Para facilitar, os resultados foram agregados por aproveitamento hidrelétrico a partir dos cálculos por município.

**Tabela 4 – Valoração das emissões anuais de carbono**

Usina	Percentual do lago em MG	Valor anual da externalidade associada as emissões de GHG - Unidade: mil reais
Miranda	100,000	767,37
Camargos	100,000	456,28
Três Marias	100,000	16.072,45
Salto Grande	100,000	87,95
Emborcação	62,069	6.408,13
Itutinga	100,000	9,84
Piau	100,000	3,00
Nova Ponte	100,000	6.772,57
Total	-	30.577,59

Para o cálculo do valor anual da externalidade, foi considerando que o carbono do metano possui um potencial de aquecimento global 20,1 vezes maior que o do dióxido de carbono quando da obtenção do carbono total emitido diariamente (Fearnside, 2001). Desta forma, neste cenário, a quantidade de carbono presente no metano é multiplicada por 20,1, e depois somada a quantidade de carbono do dióxido de carbono.

O somatório das externalidades associadas a emissão de gases de efeito estufa dos oito lagos tem o valor de R\$30.577.590,00 por ano, com base na metodologia apresentada. Subentende-se como “externalidades negativas” os impactos trazidos por uma tecnologia de geração, cujos custos não são incorporados ao preço do produto e, consequentemente, não são repassados aos consumidores, sendo arcados por uma terceira parte, ou pela sociedade como um todo [Jacomino et al., 2000].

As principais externalidades consideradas na geração de energia elétrica, pelas várias fontes e tecnologias empregadas, são os danos ao meio ambiente, às edificações e principalmente à saúde da população sob influência do empreendimento e o aquecimento do planeta devido às emissões de gases de efeito estufa. A intensidade desses danos depende das características ambientais do local onde a usina está localizada, densidade populacional e condições meteorológicas, entre outros fatores, como as medidas de segurança empregadas e tecnologias utilizadas para a redução das emissões.

Todavia, são vários os itens e problemas para as estimativas das externalidades originadas pela geração de energia elétrica, entre os quais pode-se citar a dependência das tecnologias utilizadas nos projetos, a localização das usinas, as incertezas nas causas e natureza dos impactos para a saúde e o

Tabela 5 - Valoração de externalidades

Nome do aproveitamento	Custo da externalidade – R\$	Geração MWh	Custo da externalidade – R\$/MWh	Tarifa * R\$/MWh	Relação custo da externalidade por custo de geração
UHE Três Marias	16.072,45	1.140.336	14,09	41,00	34,37%
UHE Nova Ponte	6.772,57	1.143.154	5,92	41,00	14,45%
UHE Camargos	456,28	108.034	4,22	41,00	10,30%
UHE Emborcação	6.408,13	1.980.328	3,23	41,00	7,89%
UHE Miranda	767,37	1.090.056	0,70	41,00	1,71%
UHE Salto Grande	87,95	375.322	0,23	41,00	0,57%
UHE Itutinga	9,84	157.622	0,06	41,00	0,15%
UHE Piau	3,00	79.372	0,03	41,00	0,09%

\* Tarifa média das usinas da CEMIG em 2001

Tabela 6 – Valoração das emissões para outras usinas da CEMIG

Aproveitamento	Custo da externalidade – R\$	Geração MWh fevereiro 2002	Custo da externalidade – R\$/MWh	Tarifa* R\$/MWh	Relação custo da externalidade por custo de geração
Cajuru	31.411,11	3.655	8,59	41,00	20,96%
Rio de Pedras	4.653,49	1.280	3,63	41,00	8,86%
Volta Grande	257.920,16	79.746	3,23	41,00	7,88%
Sumidouro	698,02	232	3,00	41,00	7,33%
Peti	6.980,24	5.676	1,23	41,00	2,99%
Anil	690,84	758	0,91	41,00	2,22%
São Simão	898.416,09	989.459	0,90	41,00	2,21%
Paraúna	1.745,06	2.032	0,85	41,00	2,09%
Santa Marta	576,61	685	0,84	41,00	2,05%
Jaguara	41.881,48	83.008	0,50	41,00	1,23%
Dona Rita	418,81	1.224	0,34	41,00	0,83%
Tronqueiras	930,70	3.997	0,23	41,00	0,56%
Gafanhoto	1.768,33	7.945	0,22	41,00	0,54%
Pandeiros	245,35	1.152	0,21	41,00	0,51%
Martins	232,67	1.388	0,16	41,00	0,40%
São Bernardo	262,52	3.482	0,07	41,00	0,18%

\* Tarifa média das usinas da CEMIG em 2001

ambiente, os reduzidos estudos de avaliação econômica e as questões metodológicas envolvendo a utilização dos resultados econômicos e ambientais.

Cabe ressaltar que a própria ELETROBRAS, a partir da sistematização dos aspectos e dos impactos, define as externalidades apropriadas à valoração e à incorporação no planejamento de longo prazo do setor elétrico. Isso é feito de acordo com o grau de importância para o desenvolvimento sustentável para a economia do país, da dificuldade em extinguir a externalidade através da adoção de medidas de controle, e da compensação ou mitigação e viabilidade de aplicação da valoração no planejamento de longo prazo a um custo não proibitivo.

Para se analisar a significância dos números obtidos, resolveu-se comparar o valor da externalidade (somente das emissões de gases de efeito estufa das hidrelétricas analisadas) com o custo de geração dos aproveitamentos em estudo. A geração de energia das oito usinas hidrelétricas e seu custo associado, relativos ao ano de 2001, de acordo com dados obtidos junto a gerência de planejamento de mercado da CEMIG, é apresentada na Tabela 5. Desta forma, tem-se como mensurar a ordem de grandeza das externalidades associadas a emissão dos gases de efeito estufa.

A Tabela 6 apresenta resultados das externalidades associadas à emissão de gases de efeito estufa

**Tabela 7 – Relação entre a geração de energia, a área do reservatório e o custo da externalidade**

Usina	Geração MWh	Área do lago - km <sup>2</sup>	Quociente geração pela área do lago	Relação custo da externalidade por custo de geração
Três Marias	1.140.336	1142	998,54	34,37%
Camargos	108.034	76	1.421,50	10,30%
Nova Ponte	1.143.154	446,58	2.559,80	14,45%
Emborcação	1.980.328	455,32	4.349,31	7,89%
Miranda	1.090.056	50,6	21.542,61	1,71%
Salto Grande	375.322	5,8	64.710,69	0,57%
Itutinga	157.622	1,64	96.110,98	0,15%
Piau	79.372	0,5	158.744,00	0,09%

para outras usinas da CEMIG, referenciados ao mês de fevereiro de 2002. Verifica-se que o maior impacto ocorre na PCH Cajuru (potência nominal de 7,2 MW) e corresponde a 20,1% da tarifa média. Já o menor impacto ocorre na PCH São Bernardo (potência nominal de 6,82 MW), e equivale a 0,18% do valor da tarifa da CEMIG.

Observa-se que quando se maximiza o quociente entre a geração de energia elétrica e a área do reservatório, reduz-se o impacto da externalidade no valor da tarifa. Como pode ser visto na Tabela 7, as usinas que possuem o menor quociente, também possuem o maior impacto da externalidade no valor da tarifa de energia elétrica: Três Marias, Nova Ponte, Emborcação e Camargos. Já as usinas Salto Grande, Miranda, Piau e Itutinga são as que possuem o maior quociente, e também um impacto não tão significativo no valor da externalidade.

Deve-se considerar que, neste trabalho, o valor da do custo de geração foi assumido como sendo equivalente à tarifa média de todas as usinas da CEMIG, devido à indisponibilidade de dados. Para algumas usinas, o valor do custo de geração pode ser menor que a tarifa média, o que implicaria, em termos percentuais, em um valor superior da externalidade.

## SEQÜESTRO DE CARBONO

De acordo com estudos efetuados na região amazônica, a capacidade de uma floresta de absorver carbono é um número incerto, mas acredita-se que cada hectare plantado consome de duas a cinco toneladas de carbono (Reunião Científica de Belém, 2004).

Desta forma, de acordo com os dados apresentados na Tabela 2, e considerando-se um cenário

conservativo, no qual se supõe necessários 2 hectares de floresta para se seqüestrar uma tonelada de carbono, é possível estimar qual a área de reflorestamento necessária para se capturar o carbono emitido pelas usinas em estudo. Estes valores são apresentados na Tabela 8.

Na produção de metano, o lago de Três Marias, ficou em primeiro lugar, com emissão de 196 miligramas de CH<sub>4</sub> por metro quadrado/dia. Estudos efetuados indicaram que "Três Marias é 0,84 vez menos eficiente do que uma termelétrica a carvão mineral e 0,54 vez menos eficiente do que uma termelétrica a gás natural" (Hidrelétricas Aumentam o Efeito Estufa, 2004).

**Tabela 8 – Área estimada de floresta necessário para o seqüestro do carbono.**

Aproveitamento	Área reflorestada em hectares necessária para a captura do carbono total emitido	Emissão total de carbono – ton./dia
Camargos <sup>2</sup>	163,80	81,90
Emborcação <sup>2</sup>	416,46	208,23
Itutinga <sup>2</sup>	3,54	1,77
Miranda <sup>1</sup>	132,78	66,39
Nova Ponte <sup>2</sup>	1171,92	585,96
Piau <sup>2</sup>	1,08	0,54
Salto Grande <sup>2</sup>	15,22	7,61
Três Marias <sup>1</sup>	1045,40	522,27

1-valor medido

2-valor calculado



## CONCLUSÕES

Constatou-se neste trabalho que, aplicada a metodologia proposta para a avaliação das emissões de gases de efeito estufa derivadas de reservatórios de hidrelétricas, as emissões mais significativas entre as usinas estudadas são oriundas da UHE Três Marias – 522,27 toneladas de carbono diárias (valor medido) e da UHE Nova Ponte – 585,96 toneladas de carbono diárias (valor calculado). Verificou-se também que o valor total da externalidade é diretamente relacionado ao tamanho e localização do reservatório da usina. Isto se justifica, por exemplo, devido a quantidade de biomassa alagada e a intensidade da radiação solar que incide sobre o lago.

Em termos econômicos, as externalidades associadas a estas emissões podem ser significativas. Em Três Marias, o valor da externalidade corresponde a 35% do valor do custo de geração. Verificou-se que os valores para Camargos, Emborcação e Nova Ponte também são significativos.

Uma maneira de minimizar este impacto seria investir em projetos de reflorestamento em áreas cujo tamanho seja calculado para efetuar a captura de carbono proporcional às emissões oriundas dos reservatórios. No caso dos oito aproveitamentos hidrelétricos estudados neste trabalho, verificou-se que as UHEs Nova Ponte e Três Marias são aquelas que requerem uma maior área reflorestada para realizar o seqüestro do carbono. O custo dos projetos de reflorestamento pode ter como base o valor calculado da externalidade associada às emissões de gases de efeito estufa.

Seria interessante efetuar um acompanhamento sistemático das emissões de gases de efeito estufa nos reservatórios hidrelétricos para que o valor da externalidade possa ser atualizado periodicamente, visto que a intensidade das emissões varia com o tempo. Se isto vier a ser realizado, é possível se avaliar a intensidade destas emissões em função da vida útil do reservatório. Consequentemente, se os valores de geração de energia elétrica e do seu custo associado estiverem disponíveis, torna-se possível também avaliar a variação temporal do custo da externalidade.

Assim sendo, o estudo das externalidades constitui uma linha de pesquisa que, apesar de pouco explorada, pode fornecer subsídios importantes para estudos comparativos dentre as diversas possibilidades existentes para a geração de energia elétrica, ainda mais quando considerados como um todo, e não apenas de forma isolada.

Finalmente ressalta-se que outras externalidades importantes associadas as usinas hidrelétricas

não foram incorporadas a esta análise e que também vem sendo estudadas pelos autores. Entre estas citam-se perda de produção agropecuária devido a área inundada e danos a saúde humana relacionados a doenças vinculadas a água.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao setor de geoprocessamento da ANEEL, através do Sr. Cristiano Abijaode Amaral, Superintendente de Regulação dos Setores de Operação, e ao setor de planejamento energético e a gerência de planejamento de mercado da CEMIG, através do Sr. Júlio César Ezequiel da Costa e do Sr. José Geraldo Montuori.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA Comparison of energy sources in terms of their full-energy-chain emission factors of greenhouse gases. Proceedings of an AIEA Advisory Meeting/Workshop. China, outubro de 1994.
- ANDRADE, R. Da transposição das águas do Rio São Francisco - À revitalização da bacia: as várias visões de um rio. Fórum permanente de defesa do São Francisco /International Rivers Network. Agosto de 2002. Disponível em [www.fundaj.gov.br/docs / tropico/desat/renata\\_andrade.pdf](http://www.fundaj.gov.br/docs/tropico/desat/renata_andrade.pdf). Acessado em 19/04/2004.
- CEBDS – Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável. Mercado de Crédito de carbono fora do Protocolo de Quioto. Dezembro de 2003.
- DONNES, R & GANTNER, U. Greenhouse Gas Emissions from Hydropower Full Energy Chain in Switzerland. Assessment of Greenhouse Gas Emission from the Full Energy Chain for Hydropower, Nuclear Power and Other Energy Sources - IAEA Advisory Group Meeting. Hydro-Quebec, Montreal, Canada, 12-14 de março de 1996.
- FBDS - Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável. Avaliação das Emissões de Gases de Efeito Estufa devido as Mudanças nos Estoques de Florestas Plantadas. Disponível em [http://www.mct.gov.br /clima/comunic\\_old /forest.htm](http://www.mct.gov.br/clima/comunic_old/forest.htm). Acessado em 12/01/2004.
- FEARNSIDE, P. M. Environmental Impacts of Brazil's Tucuruí Dam: Unlearned Lessons for Hydroelectric Development in Amazonia. Environmental Management Vol. 27, No. 3, pp. 377-396, 2001.
- FUNDAMENTOS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA –Disponível em [www.flipper.ind.br/ fundamentoshtml.htm](http://www.flipper.ind.br/fundamentoshtml.htm). Acessado em 23/06/2004.
- HIDRELÉTRICAS AUMENTAM O EFEITO ESTUFA, DIZ ESTUDO. Disponível em [www.an.com.br/2002 /jan/10/opai.htm](http://www.an.com.br/2002/jan/10/opai.htm). Acessado em 23/06/2004.

- HIDROVIA DO SÃO FRANCISCO – Disponível em <http://www.transportes.gov.br/Modal/Hidroviario/SaoFrancisco.htm>. Acessado em 23/06/2004.
- JACOMINO, V. M. F., BARRETO, A. A., BRANCO, O. E. A., ARONNE, I. D., PERERA, C. Estimativa das Externalidades Associadas às Emissões Atmosféricas do Ciclo de Produção de Energia Elétrica. V ENAN – Encontro Nacional de Aplicações Nucleares. Rio de Janeiro, 2000.
- JUNQUEIRA, M. S. D. Histórico e Mercado de Créditos de Carbono. Workshop Mudanças Climáticas. Belo Horizonte, 2002.
- MEIO AMBIENTE – REUNIÃO CIENTÍFICA DE BELÉM. Disponível em [www.amazonialegal.com.br/textos/meio\\_ambiente/Reuniao\\_Cientifica\\_Belem.htm](http://www.amazonialegal.com.br/textos/meio_ambiente/Reuniao_Cientifica_Belem.htm). Acessado em 05/11/2004.
- MCCULLY, P. Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams. London, Zed Books, 1996.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – Convenção sobre a mudança do clima - (<http://www.mct.gov.br/Clima/negoc/Default.htm>). Acessado em 27/04/2004
- MURPHY, B. The Politics and Economics of Large-Scale Hydropower Dams. California State University Fullerton Graduate Seminar on Cultural Ecology. USA, 2001.
- OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY Estimating Externalities of Hydro Fuel Cycles. USA, dezembro de 1994.
- OECD ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT Estimating of Greenhouse Gas Emissions and Sinks. OECD Expert Meeting, Background Report, 1991.
- PROTOTYPE CARBON FUND. Disponível em [prototypecarbonfund.org](http://prototypecarbonfund.org). Acessado em 30/03/2004.
- ROCHA, M. T. Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo CERT. Tese de doutorado defendida junto a USP em janeiro de 2003. Piracicaba, SP. Disponível em [http://www.cepea.esalq.usp.br/zip/tese\\_marcelo.pdf](http://www.cepea.esalq.usp.br/zip/tese_marcelo.pdf)
- ROSA, L. P., SANTOS, M. A., SIKAR, E. M., SIKAR, B. M., Emissões de Gases de Efeito Estufa Derivados de Reservatórios Hidrelétricos. COPPE/UFRJ e COPPETEC, 1998. [www.mct.gov.br/clima/comunic\\_old/methid.htm](http://www.mct.gov.br/clima/comunic_old/methid.htm). Acessado em 04/02/2003.
- ROSA, L. P., SANTOS, M. A., SIKAR, E. M., SIKAR, B. M., Emissões de Dióxido de Carbono e de Metano pelos Reservatórios Hidrelétricos Brasileiros. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatório de Referência Ministério da Ciência e da Tecnologia e COPPE/UFRJ, 2002. Disponível em [www.mct.gov.br/clima/comunic\\_old/pdf/metano\\_p.pdf](http://www.mct.gov.br/clima/comunic_old/pdf/metano_p.pdf)
- ROSA, L. P., SANTOS, M. A., SHERILL, E. I., Emissões de Metano e Dióxido de Carbono de Hidrelétricas Comparadas às de Termelétricas Equivalentes. Edição Especial do Centro de Estudos de Energia - ENERGE, cadernos de Energia, nº 9, março de 1996.
- SANTOS, M. A., Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa Derivadas de Hidrelétricas. Tese de doutorado defendida junto a COPPE/UFRJ em março de 2000.

WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS, LAGOS E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Organização: COPPE/UFRJ, ANEEL e Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro, dezembro de 1998. <http://www.mct.gov.br/clima/brasil/dams.htm>

### *Evaluation of Greenhouse Gas Emissions Derived from HydroPower Reservoirs in Minas Gerais*

#### **ABSTRACT**

*The construction and operation of hydropower plants generates several environmental impacts, some of them called negative externalities, whose costs are not paid by the consumers, but by society as a whole. The greenhouse gas emissions that contribute to global heating are classified as part of the negative externalities concept. This paper presents a methodology to calculate externalities associated with greenhouse gas emissions by some hydropower plants located in the state of Minas Gerais, using ANEEL – Electrical Energy National Agency, geocoding data and technical and economic information provided by the electrical sector.*

*Key-words: Externalities, greenhouse gases, hydropower plants, reservoirs*