

Quão verde é a energia azul? Uma análise do desacoplamento e da ecoeficiência na geração de energia hidroelétrica no Brasil

Claudio C. da Cruz Neto

Johannes Klingberg

Jorge Madeira Nogueira

Camille Amorim Costa Santos

Resumo

O setor de energia no Brasil se baseia fortemente nas fontes de energia renováveis. As Usinas de Energia Hidrelétrica (UHE) são a principal geradora de eletricidade no país. Entendemos que as UHE devem receber maior atenção quanto ao desempenho produtivo versus seus impactos ambientais. Por esta razão, este breve artigo tem por objetivo analisar se as usinas hidrelétricas brasileiras apresentam evidências de Desacoplamento entre as variáveis área inundada pelos reservatórios (impacto ambiental) vs PIB Setorial (vetor econômico), examinando se seus resultados apontam comportamento de ecoeficiência. Adotou-se a metodologia desenhada pela OECD. Esta metodologia está focada na descrição da relação entre dois primeiros elementos do quadro conceitual Driving Force – Pressure – State – Impact – Response (DPSIR). Para a análise de Decoupling, constatamos que predominou o Decoupling Fraco, ocorrendo em 37 dos 62 anos estudados. As UHE's foram bem-sucedidas no objetivo de ampliar oferta de energia, mas essa sua expansão vem ocorrendo a taxas marginais decrescentes, fortemente explicada pelo baixo Fator de Capacidade. E por fim, em termos de Ecoeficiência, as UHE tem apresentado taxa estável de produção de energia GWh por Km² de área alagada desde 1972.

Palavra-chave: Desacoplamento, Ecoeficiência, Hidroelétricas, Energia Renovável.

Abstract

Brazilian energy sector is starkly based on renewable energy sources. Hydroelectric Power Plants (HPPs) are the main electricity generating source in the country. It is understood that the HPPs should get more attention in relation to the productive performance versus its environmental impacts. For this reason, this short article is going to verify if the Brazilian HPPs present evidence of decoupling between two variables – Area Flooded by the Reservoirs (environmental impact) versus Energy Sector GDP (economic vector) - examining if the results point out eco-efficiency behaviour. The methodology designed by the OECD was adopted. This methodology is focused on the description of the relation between the first two elements of the conceptual framework, Driving Force – Pressure – State – Impact – Response (DPSIR). In the decoupling analysis, it was determined that the weak decoupling was prevailing in 37 of the 62 years studied. The HPPs were successful in magnifying energy supply. However, its expansion has been happening at diminishing marginal rates that can be explained by a low Capacity Factor. Finally, concerning eco-efficiency, the HPPs have been showing energy generation stable rate, GWh by km² of flooded area, since 1972.

Keywords: Decoupling, Eco-efficiency, Hydroelectric Power Plant, Energy

Introdução

O setor de energia no Brasil se baseia fortemente nas fontes de energia renováveis. As usinas de energia hidrelétrica são a sua principal geradora de eletricidade. Se a energia hidrelétrica domina a geração de eletricidade no Brasil e as grandes represas hídricas seguramente dominam o setor, é de se esperar que o serviço de geração de energia continue apostando nas grandes usinas para garantir o aumento contínuo da oferta.

Acrescente-se ainda o fato de que existe algum potencial de energia hidrelétrica não utilizada distribuído de modo não uniforme por todo o Brasil, sobretudo na região da Bacia Amazônica, distante dos principais centros consumidores da região Sudeste (BRASIL, 2015). Dito isto, acreditamos ser importante analisar alguns aspectos econômico-ambientais do processo de expansão da matriz de energia elétrica, para examinar aspectos relacionados à produtividade do setor e se este tem conseguido dissociar a oferta de energia elétrica da necessidade de novas áreas de alagamento para os reservatórios das barragens.

Este estudo tem por objetivo analisar, dentro da contribuição das usinas hidrelétricas ao Serviço de Geração de Energia Elétrica Brasileiro, dois aspectos: 1) se há evidências de decoupling entre as variáveis Área Inundada pelos reservatórios (Impacto Ambiental) e PIB Setorial (Vetor Econômico, e 2) examinar as UHE sobre a ótica de Ecoeficiência. O interesse é responder às seguintes perguntas: i) Como se comportou a oferta de energia hidroelétrica no Brasil durante os anos de 1952 a 2013?; ii) Qual a sua participação na geração total de energia elétrica do setor?; iii) Qual a taxa de crescimento da oferta desse serviço?; iv) Este setor tem realizado suas atividades com Ecoeficiência?; v) Há evidências de ganho de produtividade no setor?; vi) Como se deu a variação dos tamanhos dos reservatórios das UHE?, e, vii) Podemos encontrar sinais de decoupling no setor hidroelétrico brasileiro?.

Para desenvolver essas questões e estabelecer nossa argumentação, o artigo está estruturado em quatro seções centrais, complementadas por essa introdução e pelas conclusões do artigo. A próxima seção apresenta uma breve revisão das características teóricas e metodológicas básicas do conceito de Decoupling e Ecoeficiência. Considerando que existem muitos textos apresentando essas características, não temos a pretensão de apresentar novidade alguma nela; o interesse é apenas o de preparar o contexto geral para o desenvolvimento de nossa argumentação. Na terceira seção

detalhamos o processo metodológico adotado neste trabalho, como por exemplo, a escolha das variáveis relevantes, o detalhamento do cálculo da Elasticidade do Decoupling e o detalhamento do cálculo da Ecoeficiência. Na penúltima seção, apresentamos os resultados do trabalho e efetuamos as discussões necessárias ao alcance dos objetivos propostos, e por fim, finalizando o artigo com as Conclusões.

Revisão de Literatura

A concepção convencional de crescimento econômico está sendo desafiado e duramente criticado nos últimos anos. Argumenta-se que os problemas relacionados à insustentabilidade, insatisfação política, desigualdade social e a perda de qualidade de vida são consequências fundamentais do “crescimento desenfreado” ((BAYKAN, 2007; VAN DEN BERGH, 2011). Alguns argumentam que os seres humanos estão em perigo de exceder os limites do planeta (ROCKSTRÖM et al., 2009; STEFFEN; ROCKSTRÖM; COSTANZA, 2011).

No contexto desta problemática, pesquisadores e ativistas ambientais têm defendido a necessidade de separar o bem-estar humano do uso dos recursos biofísicos, por meio de um processo chamado Desacoplamento ou Desmaterialização (VAN CANEGHEM et al., 2010; VERFAILLIE; BIDWELL, 2000; VOET; OERS; NIKOLIC, 2004). Em sentido simplificado, este termo busca romper a relação entre “males ambientais” e os “bens econômicos”. A ideia subjacente ao termo é desacoplar (tradução livre) as pressões ambientais presentes no crescimento econômico (GUPTA, 2015).

Com base no conceito cunhado por (OECD, 2002), temos que, em termos mais específico, a expressão “desacoplamento” refere-se as taxas de crescimento relativo de uma pressão sobre o meio ambiente a partir de uma variável economicamente relevante, em que essas duas variáveis estão causalmente ligadas. As variáveis ambientais em um indicador de desacoplamento têm sido mais frequentemente expressas em unidades físicas, enquanto que variáveis econômicas têm sido expressas em unidades monetárias (a preços constantes) ou até mesmo em volumes físicos.

O conceito de Desacoplamento é importante sobretudo para analisarmos padrões de produção intensivos em uso de recursos naturais. Na ausência de desacoplamento, o aumento contínuo do crescimento econômico dos países aumentaria também as pressões ambientais, e isso inevitavelmente poderia ultrapassar a capacidade de carga dos

ecossistemas, resultando nos correspondentes efeitos negativos ao ambiente e a sociedade (Gupta2015).

O Desacoplamento ocorre quando a taxa de crescimento da variável ambientalmente relevante é menor do que a taxa de crescimento de seu vetor econômico em um dado período. Na maioria dos casos, no entanto, mudanças absolutas na pressão ambiental têm sido a preocupação principal. Importa distinguir a existência de três padrões de Desacoplamento (HABERL et al., 2004; TAPIO, 2005), Tapio2005), a saber: i) Acoplamento, ii) Desacoplamento, e, iii) Desacoplamento negativo.

No caso das variáveis que são aptas para serem indicadores de desacoplamento, estas transparecem os conceitos de Eficiência dos Recursos, Intensidade dos Recursos e Produtividade dos Recursos. Tratam-se de medidas sintéticas e que podem ser calculadas por exemplo, como taxas médias, quantidades marginais ou taxas de mudanças (para o caso das elasticidades). Não é difícil perceber que o desacoplamento é usualmente concebido tendo um foco na elasticidade sobre as mudanças no volume/uso do recurso.

Tipos de desacoplamento por Impacto Ambiental)

A classificação a seguir é incorporada dos trabalhos de Tapio (2005) e Haberl (2004).

Desacoplamento

- desacoplamento fraco, significa que ambos os vetores PIB Setorial energético (vetor econômico) e a Área alagada pelo reservatório (impacto ambiental) crescem, mas o vetor econômico, cresce mais rápido, temos $0 < \epsilon < 1$;
- desacoplamento Forte, o vetor econômico cresce enquanto que o vetor de impacto ambiental decresce, temos $\epsilon < 0$;
- desacoplamento decrescente, os vetores decrescem, mas o vetor de impacto ambiental decresce mais fortemente $\epsilon > 1$;

Desacoplamento Negativo

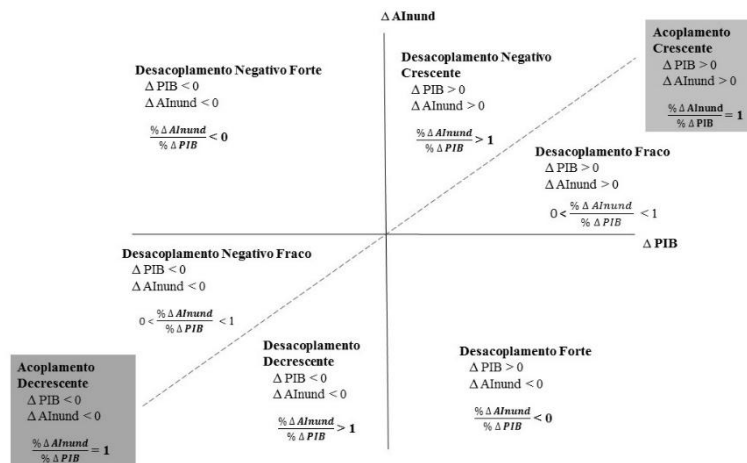
- desacoplamento Negativo Fraco, ambos os vetores decrescem, mas o vetor ambiental decresce mais lentamente do que o vetor econômico, temos $0 < \epsilon < 1$;

- desacoplamento Negativo Forte, o vetor econômico decresce enquanto que o vetor de impacto ambiental cresce, temos $\varepsilon < 0$
- desacoplamento Negativo Crescente, significa que os vetores crescem, mas o vetor de impacto ambiental cresce mais rápido, temos $\varepsilon > 1$;

Acoplamento

- Acoplamento decrescente, ocorre quando ambos os vetores decrescem na mesma velocidade, assim temos $\varepsilon = 1$;
- Acoplamento crescente, ocorre quando ambos os vetores crescem na mesma velocidade, assim temos $\varepsilon = 1$.

Figura 1: Graus Decoupling da área inundada pelo reservatório e PIB setoriais.



Fonte: Modificado de TAPIO, (2005, p.3)

No tocante às pesquisas realizadas no campo do desacoplamento, em sua maioria elas examinaram as relações em uma escala macro, predominando as avaliações globais ou comparações entre países (KRAUSMANN et al., 2008; LU et al., 2015; STEINBERGER et al., 2013; TAPIO, 2005), Lu2015a, Krausmann2008, Tapio2005). Para a degradação ambiental, os estudos priorizaram a observação para as questões de interesse global, principalmente para mudanças climáticas, cuja variável usualmente utilizada para medir a degradação ambiental tem sido a emissão de dióxido de carbono ou outros gases de efeito estufa (PENG; XIE; ZHAO, 2014; RU; CHEN; DONG, 2012; STEINBERGER et al., 2013).

Quanto as relações em escalas menores, análises de desacoplamento foram realizadas por exemplo por (ANDREONI & GALMARINI, 2012; MATTILA, 2012), Andreoni2012). Ao que parece, existe uma carência para as investigações que estejam

focadas especificamente em contextos menores, por exemplo para municípios ou até mesmo pessoas (CONRAD; CASSAR, 2014).

Por que mensurar a Ecoeficiência? Melhoramento da eficiência no uso dos recursos

Uma das formas de separar a progresso econômico da degradação ambiental é focar esforços na melhora nos níveis de eficiência no uso dos recursos. A esse processo chamamos de Ecoeficiência (GILJUM et al., 2008; WURSTHORN; POGANIETZ; SCHEBEK, 2011). O conceito de Ecoeficiência foi cunhado a partir da visão de que é possível entregar 'bens e serviços que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida a preços competitivos, reduzindo progressivamente o impacto ambiental e a intensidade de recursos ao longo do ciclo de vida, ao menos em um nível em linha com a capacidade de carga estimada da Terra (VERFAILLIE; BIDWELL, 2000). A proposição por trás do termo 'Ecoeficiência' exige que as empresas sejam capazes de gerar mais valor a partir de menores quantidades de insumos materiais e de energia, com a redução da emissão de poluentes.

No entanto, os desenvolvimentos tecnológicos associados à Ecoeficiência tem se mostrado limitados, ou melhor dizendo, sujeitos ao *Rebound Effects* tais como os de Jevons (GILLINGHAM; RAPSON; WAGNER, 2016). Esses efeitos apresentam-se no momento em que o desenvolvimento de uma nova tecnologia gera maior eficiência no uso de determinado recurso, que tornará seu uso mais atrativo, aumentando o nível de seu consumo e conseqüentemente, qualquer benefício ambiental decorrente da Ecoeficiência será neutralizado.

Mensurar a Ecoeficiência é um procedimento que requer a utilização de indicadores capazes de captar as variações na intensidade do uso dos recursos a partir da observação de suas duas dimensões econômica e ecológica. Ao juntar essas duas dimensões, podemos relacionar os valores dos produtos e serviços à influência ambiental (VERFAILLIE; BIDWELL, 2000). A ideia subjacente ao progresso via Ecoeficiência é proporcionar mais valor por unidade de recurso ambiental consumido:

$$Ecoficiência = \frac{Valor\ Produto\ Econômico_{vetor\ econômico}}{Influência\ Ambiental_{vetor\ Ambiental}}$$

A partir desta equação básica retirada de (VERFAILLIE; BIDWELL, 2000), podemos calcular a Ecoeficiência por diferentes indicadores que não podem ser fundidos em um único número. Uma vez disponibilizado as taxas decorrentes desse cálculo, pode-se escolher aquela que seja menos intensiva em recursos naturais ou que apresente melhor relação econômica por unidade de recurso ambiental consumido.

Métodos e Procedimentos

A fim de examinar o desacoplamento em um contexto de uma economia nacional, este estudo adotou a metodologia desenhada pela OECD. A metodologia está focada na descrição da relação entre dois primeiros elementos do quadro conceitual Driving Force – Pressure – State – Impact – Response (DPSIR). O método é relativamente simples, facilmente adaptável não apresentando exigência excessiva quanto a disponibilidade de conjunto de dados. Talvez por isso esta metodologia tem sido utilizada por inúmeros outros estudos (CONRAD; CASSAR, 2014; FU; HONGYU, 2013; KE; BAIMING; XIUMEI, 2010; LU et al., 2015; PENG; XIE; ZHAO, 2014; TAPIO, 2005; WANG; YUE; LU, 2011; ZHONGMIN; XIANGTAO; YU, 2012). O passo inicial foi estabelecer as variáveis relevantes.

Variáveis Relevantes

Variável Ambiental - Área inundada pelo reservatório

Parece óbvio que os estudos de Impacto Ambiental das barragens de hidroelétricas no Brasil focam prioritariamente na terra inundada pelos reservatórios, no entanto não é tão óbvio o fato de que muitos outros impactos são decorrentes desses tipos de empreendimentos. Por exemplo, o deslocamento das populações humanas; a perda de floresta pela inundação; perda da biodiversidade; a erosão e depósito de sedimentos; qualidade da água; efeito sobre os peixes, e até tremores de terra (FEARNSIDE, 2016; RICHTER et al., 2010).

Sabendo da complexidade de mensurar o impacto ambiental decorrente dessa atividade, e não desconsiderando a importância de incorporar todos os vetores ambientais relevantes, optamos por utilizar uma proxy) para os efeitos do impacto ambiental decorrente da atividade das UHE no Brasil. Assumimos que a degradação

ambiental decorrente da inundação de áreas para a composição do reservatório das usinas é irreversível num horizonte temporal relevante para o cálculo econômico. Quanto a fonte dos dados, coletamos as informações diretamente da Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel. O banco de dados da Aneel informa que já foram instaladas 184 UHE no país, entretanto o presente estudo considerou as UHE inauguradas a partir do ano de 1952. A razão dessa escolha se deve ao fato de que as UHE inauguradas em anos anteriores não apresentavam detalhamento desejado nas informações de cadastro.

Variável Econômica - Produto Interno Bruto (Setorial)

A variável econômica relevante escolhida foi o PIB desagregado ao nível do setor da indústria (nas atividades de "eletricidade, gás e água"). A intenção foi que através desse indicador seja possível verificar as variações na intensidade do uso dos recursos à partir da sua demonstração no PIB, e estando livre de algumas influências externas ao setor elétrico. Para evitar a influência do fator preço, deflacionamos o PIB Setorial a preços do ano 2000.

Calculando a elasticidade do desacoplamento

A exemplo de (TAPIO, 2005) usamos o quadro conceitual de (VEHMAS, 2009), em que são possíveis distinguir 8 possibilidades lógicas do desacoplamento por Impacto Ambiental. Diferentemente de (TAPIO, 2005) não usamos o intervalo de variação de 20% (+ ou -) para os valores de elasticidade unitária. Nestes casos admitimos que na elasticidade unitária não ocorre desacoplamento, sendo mais precisamente nomeado como Acoplamento (crescente ou decrescente). Admitimos que os valores assumidos pelas variáveis PIB Setorial (Vetor econômico) e Área de Reservatório (Impacto ambiental) podem assumir valores negativos ou positivos. Assim temos que a Elasticidade do desacoplamento é dado por:

$$\varepsilon_{AI,PIB} = \frac{\Delta Reseratório_i}{\Delta PIB_{Setorial}}$$

Onde,

$\Delta Reseratório_i$ é a Área Reservatório em km^2 representa o acréscimo de novas áreas inundadas pela incorporação de novas usinas hidroelétricas no País.

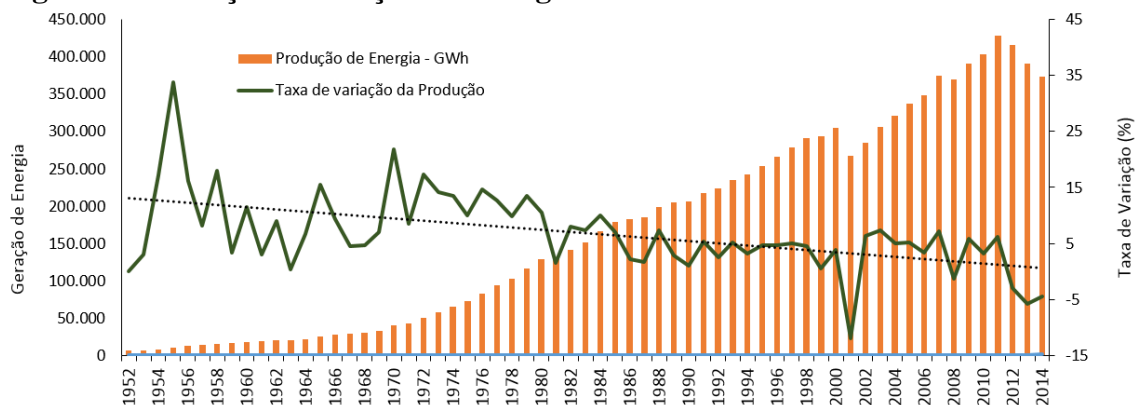
$\Delta PIB_{Setorial}$ representa a variação do Produto Interno Bruto em relação ao ano anterior.

Resultados e Discussão

Resultados relativos à Ecoeficiência

Parece consenso que nos centros de geração de energia elétrica a principal preocupação é com a produção de potência ativa. Segundo dados do Balanço Energético Nacional (2014) a Matriz de Energia Elétrica brasileira possui predominância de potência advinda da geração hidroelétrica (61,5%), seguido de fóssil (18,06%), biomassa (7,17%), importação (5,54%), eólica (4,54%, nuclear (1,35%) e solar (0,01%). A energia hidroelétrica por responder pela maior fatia da geração de energia elétrica¹, precisou expandir a sua produção e assim o fez por quase todo o período analisado na figura 2.

Figura 2: Produção e variação da Energia Hidroelétrica Total entre 1952-2014



Fonte: EPE e ANELL.

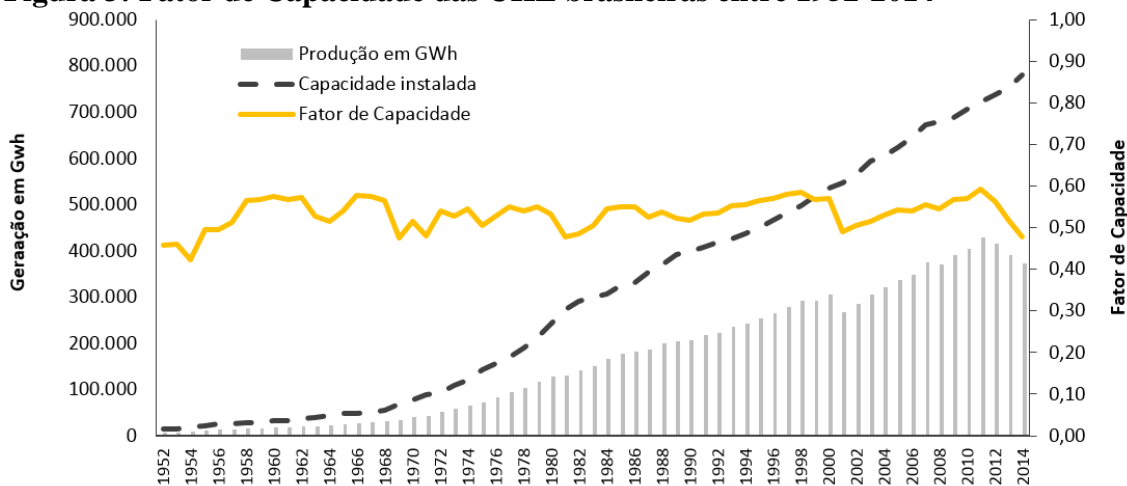
A informação sugere que a continua expansão da produção de energia elétrica oriunda das UHE só foi interrompida nos anos de 2001, 2008, 2012 a 2014. Em contrapartida, o gráfico também sugere que a produção não está crescendo a taxas marginais crescentes, mas sim o inverso, no qual a linha de tendência parece apontar crescimento a taxas decrescentes. O fator provável dessa redução é a existência de

¹ O número plantas no Brasil em 2014 foi de 1192, as UHE somavam 198 plantas gerando 87.701 MW; As CGH somavam 527 plantas gerando 372 MW e as PCH (467 plantas) gerando 4.483 MW.

eventos estocásticos, tais como eventos climáticos que provocam alterações no ciclo hidrológico resultando em secas plurianuais.

Outro fator cogitado é a crescente imposição de restrições ambientais à construção de novos grandes reservatórios (voltados para tentar compensar os regimes pluviométricos mais secos), no entanto esse aspecto parece não ser tão determinante quando analisamos que na média, as usinas têm operado abaixo da sua capacidade instalada, ver Figura 3. A partir da observação do Fator de Capacidade²) fica evidenciado que a taxa de utilização esteve variando entre 42% (1954) a 59% (1998 e 2011). Na verdade, a disponibilidade de água nos reservatórios tem relação direta com o resultado desse índice, ficando dependente das condições hidrológicas e dos padrões de produção das represas à montante³.

Figura 3: Fator de Capacidade das UHE brasileiras entre 1952-2014



Fonte: EPE e ANELL.

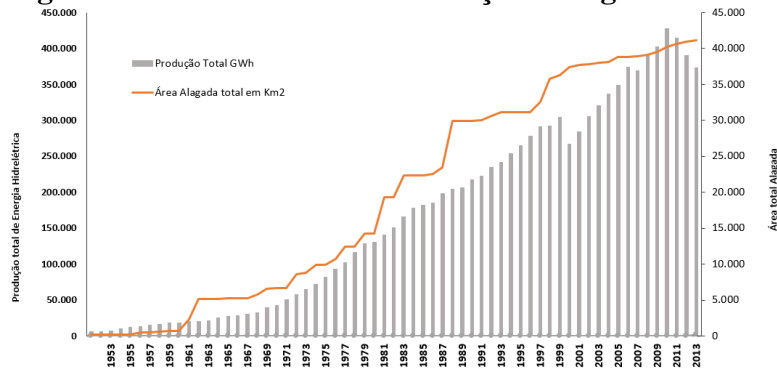
Aumentar o tamanho das hidrelétricas resulta em aumento de produção, mas não assegura mudanças positivas em seu Fator de Capacidade. Note que Prado Jr. & Berg (2012) estimou para as grandes hidrelétricas que não existe evidência de correlação entre tamanho da planta e o Fator de Capacidade ($R^2 = -0,10$), encontraram melhora nesse resultado quando realizaram as análises regionalizadas, nas regiões Norte e Centro Oeste, respectivamente ($R^2 = -0,58$ e $R^2 = -0,48$). Encontramos correlação positiva ($R^2 = 0,32$) entre Área total inundada pelos reservatórios e Fator de capacidade.

² Esse fator é usado como uma medida de efetividade, o grau de disponibilidade da UHE - a obtemos a partir da razão entre a produção gerada e a capacidade instalada.

³ A maioria das UHE (87%) tem capacidade potencial instalada superior a 30MW, que representam 13,4% do número total de empreendimentos hidroelétricos no Brasil.

A incorporação de novas UHE ao sistema (via construção ou ampliação de estruturas já existentes), resulta em aumento da capacidade instalada, e um consequente aumento da oferta de energia elétrica. Contudo, esse processo vem acompanhado da incorporação de novas áreas que são inundadas a fim de compor o reservatório das UHE, ver Figura 4.

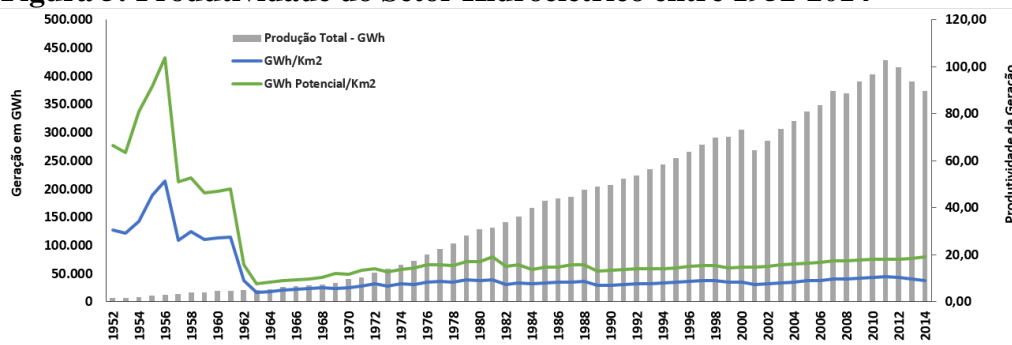
Figura 4: Área inundada vs Produção Energia Hidroelétrica entre 1952-2013



Fonte: EPE e ANELL

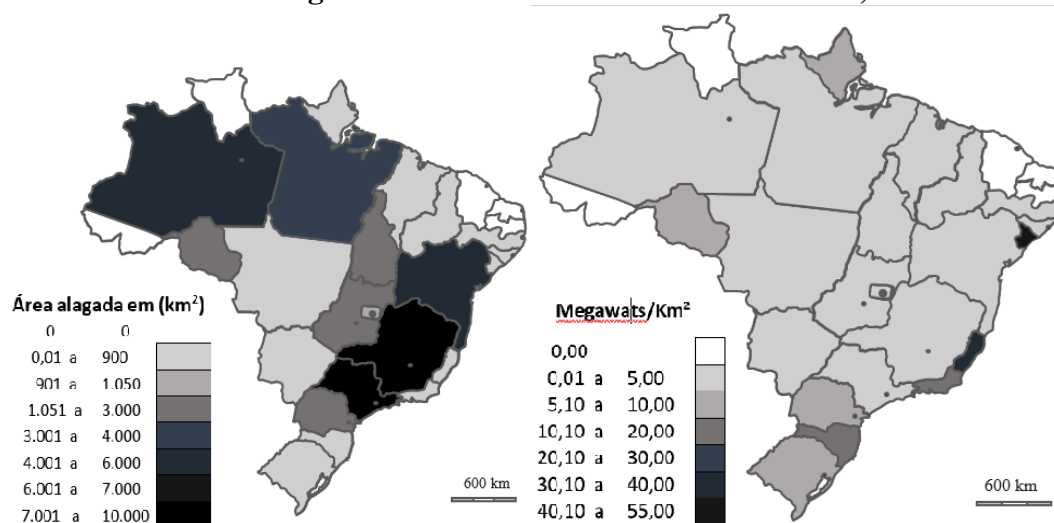
Sobre esse ponto, os dados sugerem (Figura 4) que entre os anos de 1956-1963 a relação Gigawatts por quilômetro quadrado de área alagada (Km^2) foi decrescente, variando entre $51,1(\text{GWh}/\text{Km}^2)$ em 1956 e $4,01(\text{GWh}/\text{Km}^2)$ em 1963. Essa relação passou a se estabilizar ao longo do restante período estudado, não permitindo afirmar que o setor apresenta ganhos de produtividade. Para melhor visualizar isso, note que a Figura 6 apresenta o desempenho de cada estado brasileiro e sugere que os estados com maior área de reservatório (e o presente estudo escolheu essa variável como proxy) para o fator impacto ambiental) apresentam as menores taxas de produtividade, podendo ser considerados menos ecoeficientes, por exemplo, que os estados de Sergipe e Espírito Santo, os dois estados que apresentaram melhores resultados.

Figura 5: Produtividade do Setor Hidroelétrico entre 1952-2014



Fonte: EPE e ANELL

Figura 6: Área inundada por Estado - Produtividade de Energia por Estado
Produtividade da Energia e tamanho das suas Áreas inundadas, 1953-2014.



Fonte: Elaborado pelos autores com os dados obtidos da EPE e ANEEL

Por fim, soma-se ainda o fato de que o Brasil já tem aproveitado quase que ao máximo o potencial (locacional) de geração hidrelétrica, resta à Bacia Amazônica o papel de ser a "menina dos olhos" dos novos empreendimentos nesse setor. Segundo dados do Relatório "Brasil 2040: cenários e alternativas de adaptação à mudança do clima", nada menos que 30 das 48 barragens planejadas serão situadas em Floresta Amazônica.

Considerando que essas grandes UHE apresentam sérias preocupações quanto a sua viabilidade financeira em função da vazão esperada dos rios, maiores reduções no fluxo da vazão poderiam significar que a barragem será financeiramente insustentável. Logo, o investimento realizado, os danos em grande escala sobre a biodiversidade e aos povos localizados ao longo do rio, seriam custos elevados para gerar benefícios relativamente pequenos.

Resultados relativos a desacoplamento

Baseado na equação (2) e no método para expressar o resultado do índice de desacoplamento, os dados encontrados foram dispostos e avaliados na Tabela 2 (Anexo). A análise foi realizada para o período de 1952 a 2013. Não obtivemos os dados necessários para realizar o cálculo para o ano de 2014. Os dados encontrados sobre criação/aumento do tamanho das áreas inundadas e o crescimento econômico do PIB Setorial tem se materializado um estado de desacoplamento fraco - quando ambos os vetores PIB setorial (econômico) e a áreas inundadas pelos reservatórios (impacto

ambiental) crescem, mas o vetor econômico PIB setorial, cresce mais rápido - ocorreu em 25 dos 61 anos estudados). O estado de desacoplamento negativo crescente ocorreu em 16 anos do período estudado. Entre os anos de 1952 a 1963, encontramos estado de desacoplamento Negativo Crescente, que significa que a taxa variação do impacto ambiental e taxa de variação do PIB Setorial, ocorreram com o mesmo sinal positivo, mas diferenciaram na velocidade da variação e encontramos estado de desacoplamento Fraco.

O destaque negativo deve ser atribuído aos anos de 1957, 1962 e 1963, em que o tamanho de Área Inundada (Impacto Ambiental) teve uma variação positiva média superior a 156%, o que pode ser facilmente explicado pela inauguração de duas grandes UHE's - Três Marias e Furnas, e a variação média do PIB Setorial para o período (1952-1963) foi de 6,78%.

Para o período de 1964-1975, novamente encontramos estado de desacoplamento Negativo Crescente (presente em 2 anos) e desacoplamento Fraco (presente em 6 anos). Os anos de 1967 e 1968 não apresentaram variação no tamanho da área inundada, por isso não apresentam Status de desacoplamento. A variação média do PIB Setorial no período foi de 10,9% enquanto que a variação média do tamanho da área alagada foi de 5,9%, o que significou a incorporação de mais de 4.715 Km² de área alagada.

Os anos de 1976 a 1989 também apresentaram estado de desacoplamento Negativo Crescente (presente em 5 anos) e desacoplamento Fraco (presente em 7 anos). Foi um período com grande incorporação de novas áreas inundadas - 19.108 Km², média anual de 868,58 Km² e variação média anual 8,7%, o que pode ser explicado pela inauguração das UHE de Balbina, Itaipu (parte brasileira), Sobradinho e Tucuruí I e II.

A análise do período 1990-2000 mostra a estabilização em torno do estado de desacoplamento Fraco. Chama atenção nesse período que a taxa de variação média de área alagada, que ficou em torno de 1,8%, foi durante quase todo o período inferior a taxa de variação média do PIB setorial (4,16%). Nesse período 21 UHE foram inauguradas (destaque para as maiores: Serra da Mesa e Três Irmãos), mas a incorporação de novas áreas (6.499 Km²) foi inferior ao período imediatamente anterior, os anos de 1964-1975.

O período de 2001 a 2013 foi indiscutivelmente um período de desacoplamento Fraco. Contudo, no ano de 2001, ocorreu uma forte retração do PIB Setorial fazendo com o estado fosse desacoplamento Forte. Nesse período foram inauguradas 58 UHE

que incorporaram 4.612 Km² de área inundada, tendo uma média anual de 79,5 Km². O PIB Setorial variou na média 3,44%, enquanto que a incorporação de novas áreas inundadas foi da ordem de 0,9% ao ano.

Limitações ao conceito de desacoplamento

A despeito do conceito de desacoplamento ser atraente em grande parte por conta da sua simplicidade, a exposição gráfica de indicadores sintéticos de desacoplamento muitas vezes passa uma mensagem confusa ou dúbia. Por exemplo, ao considerar uma economia em crescimento econômico (vetores econômicos crescem), o desacoplamento decrescente demonstra que estaria havendo aumento nas pressões ambientais, apesar de à taxa decrescente.

Em algumas situações é possível não existir um desenvolvimento positivo para a sociedade como um todo (OECD, 2002). Acrescente que o conceito de desacoplamento não tem uma ligação automática com a capacidade do meio ambiente de se sustentar, absorver ou resistir aos vários tipos de pressão (disposição, descargas, colheita/extração). Para o caso de recursos naturais renováveis, uma interpretação significativa do relacionamento entre pressão ambiental do vetor econômico exigirá maiores informações sobre a intensidade do uso dos recursos em questão (p.e taxa de colheita comparada à capacidade de recarga do recurso).

Ademais, numa análise de desacoplamento, o preço também deve ser considerado, pois trata-se de um importante fator de influência na pressão ambiental ou, mais precisamente no uso dos recursos naturais. A ausência desta informação na abordagem pode fragilizar significativamente o estudo, pois é consenso que a teoria econômica mostra que os preços observados no mercado refletem a resposta dos agentes à escassez e as intervenções de política pública. E uma vez que a relação entre os vetores econômicos e as pressões ambientais são frequentemente complexas, podemos argumentar que boa parte dos vetores econômicos tem múltiplos efeitos ambientais, e a maioria das pressões ambientais são geradas por múltiplos vetores econômicos, que são afetados pelas respostas da sociedade.

Finalmente, a (UNEP, 2011) observou que no âmbito do desafio do desacoplamento, embora o desacoplamento de recursos ou impactos ambientais estejam ocorrendo, estes estão ocorrendo “a uma taxa que é insuficiente para atender às demandas de uma sociedade justa e sustentável”.

Qual o nosso caminho à frente?

A literatura sinaliza que tem havido falha no levantamento e mensuração dos custos e benefícios das barragens das UHE (FEARNSIDE, 2014, 2016; WINEMILLER et al., 2016). Essa falha tem resultando em vácuo de informações com respeito aos impactos sociais e ambientais das UHE e é um grave problema recorrente no processo de tomada de decisão quanto a instalação de novas barragens (FEARNSIDE, 2016). A lógica que se segue é de que as barragens têm seus projetos anunciados quando ainda nem possuem um estudo de impacto ambiental finalizado. Logo, o estudo realizado servirá apenas para a minimização dos impactos detectados, ao invés de uma alternativa que evite tais impactos.

Nesse aspecto, o problema relevante aponta que os estudos realizados pelos proponentes dos projetos das UHE dão somente uma pequena ideia do impacto real das barragens (FEARNSIDE, 2014), o chamado "viés inerente" a produção de relatórios de impactos ambientais de baixa qualidade técnica. As firmas que contratam esses relatórios são as mesmas que estarão pleiteando vencer os contratos de construção de barragens. Como resultado, tem-se instalado um processo em que se dá ênfase na exposição dos aspectos positivos esperado dos projetos, enquanto que os aspectos negativos esperados são minimizados. Certamente é um problema que remonta ao início da criação do EIA/RIMA no Brasil, sem nenhuma previsão de ser solucionado.

Os argumentos favoráveis a necessidade de melhorar o processo de licenciamento ambiental no Brasil já vem sendo defendido (BRITTO et al., 2015; FEARNSIDE, 2016). Sem dúvida existe uma certa ironia no sistema de licenças ambientais atual, uma vez que o conteúdo do EIA/RIMA e as audiências públicas que se seguem no processo de licenciamento, tem pouco efeito sobre as decisões concernentes às licenças dos projetos (FEARNSIDE, 2014). O atual modelo de licenças tem restringido os relatórios de EIA/RIMA em documentos que servem apenas para legalizar a decisão tomada pela autoridade competente (FEARNSIDE, 2014, 2016).

Responsabilizar apenas o licenciamento ambiental como elo sensível nesse processo é um equívoco, ratificamos a ideia de que existe uma significativa discrepância entre a exigência legal e o que tem se concretizado nas atividades de impacto ambiental. Para melhor entender, lancemos mão do outro elemento que contribui para a perpetuação dos danos causados pelas UHE'S: a não internalização dos custos

ambientais provenientes das UHE. Negligenciar tais custos tem produzido um quadro distorcido da realidade no Brasil, gerando ineficiências econômicas que impedem a minimização dos danos ambientais dos reservatórios.

Em última análise, acreditamos que as externalidades das UHE tem ocorrido graças a falhas na definição dos direitos de propriedades em jogo. Em teoria, esses direitos especificariam as normas de comportamento com relação àquilo que cada um precisa observar na interação com os outros agentes e/ou meio ambiente ou a punição por sua não-observância.

Um exemplo de externalidade decorrente das UHE é a emissão de gases de efeito estufa. A emissão é decorrente sobretudo da decomposição de matéria orgânica presente nas áreas inundadas pelos reservatórios (BRITTO et al., 2015; FARIA et al., 2015). Algo que já é conhecido a algum tempo, mas parece não exercer qualquer efeito perceptível sobre as decisões de construção de grandes barragens. Já houve uma inclusão da discussão sobre os gases de efeito nos estudos em avaliação de impacto ambiental (FEARNSIDE, 2011), mas nada mudou até então.

A percepção pública entende que a energia hidroelétrica é "limpa", e isso se deve ao fato de que as estimativas oficiais para emissão de gases de efeito estufa das barragens são subestimados (FARIA et al., 2015). Deve-se destacar que a emissão de gases de efeito estufa é apenas uma das muitas externalidades associadas a energia derivada de (MASSOLI; BORGES, 2014; ZHANG; XU; LI, 2015).

Uma vez que a externalidade seja estimada, via estudos produzidos para o Licenciamento Ambiental, o setor hidroelétrico poderia ser pressionado legalmente a arcar com a internalização desses custos via tributação⁴ por exemplo. A implicação mais imediata possível seria o aumento dos custos de produção da atividade, o que mais adiante significaria o repasse via preço ao consumidor final. É necessário entender que diante da existência das externalidades, o comportamento individual das UHE de maximização de lucro não levará a economia desse setor a um ponto eficiente, justamente porque o benefício marginal privado da atividade hidroelétrica não incorpora o custo marginal social decorrente da atividade.

A alternativa adotada no Brasil para internalização parcial dos custos ambientais foi a instituição de uma compensação financeira paga pelas empresas de geração de energia elétrica aos estados e municípios afetados pelo empreendimento, e tem por

⁴ O tributo teorizado por A. C. Pigou em 1932, tenta corrigir as discrepâncias entre o custo privado de um bem e o seu custo social, decorrente da utilização dos recursos ambientais),

objetivo recompor as estruturas sociais e econômicas da comunidade atingida via transferência de recursos monetários, ficando a gestão desse recurso a carga de cada município (SILVA, 2007). Deve-se atentar para o fato de que a definição do valor a ser cobrado pela compensação financeira não está induzindo a alteração de comportamento do agente empreendedor, e o valor pago pelas usinas provavelmente não corresponde o nível ótimo de cobrança, no qual o custo marginal se iguala ao benefício marginal.

A pergunta final que devemos fazer, é sobre como mudar o sistema descrito acima. Do contrário, o panorama que vislumbramos para a pressão ambiental exercida pelas usinas hidrelétricas é a perpetuação do padrão existente, sem a necessária internalização dos custos ambientais ora existentes.

Conclusão

O simples aumento das áreas inundadas (gerando aumento nos níveis de impacto ambiental) não garantiram aumento da produtividade marginal das UHE. Pelo contrário, a produtividade foi negativamente afetada. Isso não nos permite dizer que a decisão de aumentar as áreas inundadas seja a causa da redução da produtividade marginal das UHE. No entanto, podemos afirmar que essa decisão não foi bem sucedida quanto ao objetivo de aumentar marginalmente (a taxas crescentes) a produção de energia hidrelétrica no País. Como saldo para processo que se desenrolou ao longo de mais de 50 anos, somos inclinados a crer que a principal intenção com a criação dessas UHE foi de fato aumentar a oferta de energia elétrica sem uma preocupação aparente com os resultados de produtividade das plantas, o que se explica quando visualizamos os resultados para o Fator de Capacidade.

Imaginemos também que os custos monetários de hidrelétricas são (ou pelo menos podem ser) partilhados com a sociedade. Isso ocorre comumente por meio da cobrança de tributos e de contas de eletricidade mais altas. Contudo, a maior parte dos impactos humanos e ambientais é infligido sobre um número (pequeno) de pessoas que estão estabelecidas ao longo do rio que foi represado e essas pessoas provavelmente continuarão longe daquelas que receberão os benefícios da atividade. Dito isso, uma pergunta nos interessa e pode ser uma boa inquietação para outras análises: a construção de reservatórios cada vez maiores se dá por que "o seu custo de construção é inferior ao custo financeiro decorrente da incerteza sobre a vazão ecológica em barragens menores?"

Uma vez que o Brasil já tem aproveitado quase que ao máximo o potencial (locacional) de geração hidrelétrica, é possível que estejamos repetindo os mesmos erros do passado ao começar a replicar na Bacia Amazônica a mesma lógica de implantação das UHE do restante do país. Lógica essa que se concretiza via incorporação de potencial de geração que será subutilizado a taxas que, possivelmente, sejam ainda mais baixas que as taxas de produtividade registradas no período estudado aqui. A forma alternativa e que vem sendo adotada na Bacia Amazônica - UHE a fio d'água - parece ser uma alternativa para redução do impacto ambiental, mas ela tem enfrentado críticas quanto a sua capacidade de regular a vazão dos fluxos de água enquanto produz energia sobretudo em períodos de seca.

Para análise de desacoplamento entre Áreas inundadas e PIB Setorial, constatamos que por se repetir em 37 dos anos estudados, o tipo que predominou no período foi o desacoplamento Fraco, aquele no qual ocorre a variação positiva dos dois vetores, sendo que a variação é mais forte no vetor econômico do que no ambiental. Isso significa dizer que o PIB Setorial cresceu mais rápido do que a ampliação do tamanho das áreas de reservatórios, resultado este que vem se repetindo desde 2002. Tal resultado não contesta as conclusões acerca da tendência de baixa produtividade do setor hidrelétrico brasileiro, pois o resultado de desacoplamento analisa a relação entre Áreas inundadas x PIB Setorial, enquanto que as análises de produtividade foram para os fatores Áreas inundadas x Geração Hidrelétrica.

Futuras investigações

Segundo dados da ANEEL, até 2015, 38 PCH e 10 UHE estão em Construção - ambas com potência fiscalizada de 504.301 e 13.546.242 kw, respectivamente. Se olharmos para os empreendimentos em construção não iniciada, as PCH superam em 186% a potência fiscalizada esperada das UHE. Em função da possível ultrapassagem do número de UHE pelas PCH, entendemos ser necessário investigar se: uma vez que as PCH estejam sendo escolhidas em detrimento das UHE, a escolha tem ocorrido em função de uma melhor viabilidade técnico-financeira ou em função da pressão exercida pela autoridade ambiental através de instrumentos de comando e controle, tal como o licenciamento ambiental?

Bibliografia

ANDREONI, V.; GALMARINI, S. Decoupling economic growth from carbon dioxide emissions: A decomposition analysis of Italian energy consumption. **Energy**, v. 44, n. 1, p. 682–691, 2012.

BAYKAN, B. G. From limits to growth to degrowth within French green politics. **Environmental Politics**, v. 16, n. 3, p. 513–517, 2007.

BRASIL. **Brasil 2040 - Resumo Executivo**. Brasília: [s.n.].

BRITTO, F. G. A. et al. Quali-Quantitative Analysis of Brazilian Environmental Licensing of Hydropower Plants. **International Journal of Geosciences, Scientific Research Publishing**, v. 6, n. July, p. 692–704, 2015.

CONRAD, E.; CASSAR, L. Decoupling Economic Growth and Environmental Degradation: Reviewing Progress to Date in the Small Island State of Malta. **Sustainability**, v. 6, n. 10, p. 6729–6750, 2014.

FARIA, F. A. M. et al. Estimating greenhouse gas emissions from future Amazonian hydroelectric reservoirs. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 12, p. 124019, 2015.

FEARNSIDE, P. M. Gases de Efeito Estufa no EIA-RIMA da Hidrelétrica de Belo Monte. **Novos Cadernos NAEA**, v. 14, n. 1, p. 5–19, 2011.

FEARNSIDE, P. M. Brazil's Madeira River Dams: A Setback for Environmental Policy in Amazonian Development. **Water Alternatives**, v. 7, n. 1, p. 256–269, 2014.

FEARNSIDE, P. M. Environmental and Social Impacts of Hydroelectric Dams in Brazilian Amazonia: Implications for the Aluminum Industry. **World Development**, v. 77, p. 48–65, 2016.

FU, L.; HONGYU, L. Analysis of relationships between cultivated land occupation and economic growth in Jiangsu province based on decoupling theory. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, v. 29, n. 13, p. 237–243(7), 2013.

GILJUM, S. et al. Modelling scenarios towards a sustainable use of natural resources in Europe. **Environmental Science & Policy**, v. 11, n. 3, p. 204–216, 2008.

GILLINGHAM, K.; RAPSON, D.; WAGNER, G. The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy. **Review of Environmental Economics & Policy**, p. 1–29, 2016.

GUPTA, S. Decoupling: a step toward sustainable development with reference to OECD countries. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 4509, n. September, p. 1–10, 2015.

HABERL, H. et al. Progress towards sustainability? What the conceptual framework of material and energy flow accounting (MEFA) can offer. **Land Use Policy**, v. 21, n. 3, p.

199–213, 2004.

KE, Y.; BAIMING, C.; XIUMEI, T. Decoupling Relationship Between Cultivated Land Occupation by Construction and Economic Growth in China During 1998–2007. **Chinese Journal of Population Resources and Environment**, v. 8, n. 1, p. 38–46, 2010.

KRAUSMANN, F. et al. The Global Sociometabolic Transition. **Journal of Industrial Ecology**, v. 12, n. 5–6, p. 637–656, 2008.

LU, Q. et al. Multi-sectoral decomposition in decoupling industrial growth from carbon emissions in the developed Jiangsu Province, China. **Energy**, v. 82, p. 414–425, 2015.

MASSOLI, E. C.; BORGES, F. Q. Análise das externalidades geradas pela Usina Hidrelétrica de Estreito (MA) e o Processo de Desenvolvimento. **Desenvolvimento em Questão**, v. 12, n. 28, p. 251–278, 2014.

MATTILA, T. Any sustainable decoupling in the Finnish economy? A comparison of the pathways and sensitivities of GDP and ecological footprint 2002–2005. **Ecological Indicators**, v. 16, p. 128–134, 2012.

OECD. **Indicators to Measure Decoupling of Environmental Pressure from Economic Growth**. Paris, França.: [s.n.].

PENG, S. L.; XIE, H.; ZHAO, G. Q. Decoupling Analysis of Economic Growth and Carbon Emissions in Henan Province. **Advanced Materials Research**, v. 1073–1076, p. 2545–2548, 2014.

PRADO JR., F. A.; BERG, S. V. Capacity Factors of Brazilian Hydroelectric power Plants: implications for cost effectiveness. **Uma ética para quantos?**, v. XXXIII, n. 2, p. 81–87, 2012.

RICHTER, B. D. et al. Lost in development's shadow: The downstream human consequences of dams. **Water Alternatives**, v. 3, n. 2, p. 14–42, 2010.

ROCKSTRÖM, A. et al. Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. **Ecology And Society**, v. 14, n. 2, 2009.

RU, X.; CHEN, S.; DONG, H. An Empirical Study on Relationship between Economic Growth and Carbon Emissions Based on Decoupling Theory. **Journal of Sustainable Development**, v. 5, n. 8, p. 43–52, 2012.

SILVA, L. L. **A Compensação Financeira das Usinas Hidrelétricas como Instrumento Econômico de Desenvolvimento Social, Econômico e Ambiental**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2007.

STEFFEN, B. W.; ROCKSTRÖM, J.; COSTANZA, R. How Defining Planetary Boundaries Can Transform Our Approach to Growth. **Solutions**, v. 2, p. 11, 2011.

STEINBERGER, J. K. et al. Development and dematerialization: an international study.

PloS one, v. 8, n. 10, p. e70385, 2013.

TAPIO, P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001. **Transport Policy**, v. 12, p. 137–151, 2005.

UNEP. **Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth**. [s.l.] International Resource Panel, 2011.

VAN CANEGHEM, J. et al. Eco-efficiency trends of the Flemish industry: Decoupling of environmental impact from economic growth. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 14, p. 1349–1357, 2010.

VAN DEN BERGH, J. C. J. M. Environment versus growth - A criticism of “degrowth” and a plea for “a-growth”. **Ecological Economics**, v. 70, n. 5, p. 881–890, 2011.

VEHMAS, J. Decomposition analysis of CO₂ emissions from fuel combustion in selected countries. **International journal of environmental technology and management**, v. 11, n. 1–3, p. 47–67, 2009.

VERFAILLIE, H. A.; BIDWELL, R. Eco-efficiency: a Guide To Reporting Company Performance. **World Business Council for Sustainable Development**, 2000.

VOET, E.; OERS, L.; NIKOLIC, I. Dematerialization: Not Just a Matter of Weight. **Journal of Industrial Ecology**, v. 8, n. 4, p. 121–137, 2004.

WANG, H. M.; YUE, Q.; LU, Z. W. Decoupling Analysis of Economic Growth and Total Primary Energy Supply for the BRICS: 1971-2008. **Applied Mechanics and Materials**, v. 84–85, p. 765–769, 2011.

WINEMILLER, K. O. et al. Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. **Science**, v. 351, n. 6269, p. 128–129, 2016.

WURSTHORN, S.; POGANIETZ, W. R.; SCHEBEK, L. Economic-environmental monitoring indicators for European countries: A disaggregated sector-based approach for monitoring eco-efficiency. **Ecological Economics**, v. 70, n. 3, p. 487–496, 2011.

ZHANG, J.; XU, L.; LI, X. Review on the externalities of hydropower: A comparison between large and small hydropower projects in Tibet based on the CO₂ equivalent. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 176–185, 2015.

ZHONGMIN, L.; XIANGTAO, C.; YU, Y. Target Gap of Emission Reduction for China: Analysis based on Elastic Decoupling. **Chinese Journal of Population Resources and Environment**, v. 10, n. 2, p. 84–93, 2012.

Sobre o autor:

Claudiano C. da Cruz Neto

Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente pela Universidade Estadual de Santa Cruz, Brasil(2009).

Johannes klingberg

Mestrado em Renewable Energies Management pelo Fachhochschule Köln, Alemanha(2016)

Jorge Madeira Nogueira

Doutorado em Desenvolvimento Agrário pela University of London, Inglaterra(1982)
Professor titular da Universidade de Brasília , Brasil

Camille Amorim Costa Santos

Ensino Médio (2o grau) pela Associação Lecionar Unificada de Brasília, Brasil(2014)
Programa de Iniciação Científica da Universidade de Brasília , Brasil

Artigo recebido em 01/03/2017

Aprovado em 10/03/2017

Como citar esse artigo:

NETO, Claudiano C. da Cruz; KLINGBERG, Johannes; NOGUEIRA, Jorge Madeira; SANTOS, Camille Amorim Costa. Quão verde é a energia azul? Uma análise do desacoplamento e da ecoeficiência na geração de energia hidroelétrica no Brasil. **Revista de Economia da UEG**. Vol. 13, N.º 1, jan/jun. 2017.