

# Assessment of energy generation externalities and their incorporation on the benefit-cost ratio for energy auctions

## Metodologia para valoração das externalidades da geração de energia e sua incorporação ao índice custo-benefício dos leilões de energia

Victor Kyoichi Bernardes<sup>1</sup>

Daniel Henrique Marco Detzel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Leopardus Engenharia Ltda.

victor@leopardus.com.br

<sup>2</sup>Universidade Federal do Paraná

detzel@ufpr.br

**Abstract:** Electricity auctions disregard generation externalities that impact the tariff or cause negative impacts and benefits for society and the environment. In this context, this paper details five externalities and proposes valuation methodologies, including them directly in the Benefit-Cost Index (BCI) of the enterprises. The methods were applied to a case study with four plants that sold their energy in auctions, namely, two hydroelectric plants of different sizes (HPP and SHPP) and two thermal plants (TPP) of different fuels (natural gas and diesel). As a result, the BCI at the HPP, the SHPP, and the natural gas-fuelled TPP had their BCIs reduced by R\$4.86/MWh, R\$0.69/MWh, and R\$0.04/MWh, respectively. The diesel-fuelled TPP had its ICB increased by R\$1.28/MWh. The work shows that the benefit of regularization reservoirs and the impact of particulate emissions presented the greatest changes in the final energy price of each plant.

**Keywords:** Energy auctions, externalities, benefit-cost ratio, hydroelectricity, thermoelectricity.

**Resumo:** Os leilões de compra de energia elétrica desconsideram externalidades da geração que impactam na tarifa ou causam impactos negativos e benefícios para a sociedade e meio ambiente. Nesse contexto, este artigo detalha cinco externalidades e propõe metodologias de valoração, incluindo-as diretamente no Índice Custo-Benefício (ICB) dos empreendimentos. Os métodos foram aplicados a um estudo de caso com quatro usinas que venderam sua energia em leilões, sendo duas hidrelétricas de diferentes portes (UHE e PCH) e duas térmicas (UTE) de diferentes combustíveis (gás natural e óleo diesel). Como resultado, a UHE, a PCH e a UTE a gás natural tiveram seus ICBs reduzidos em R\$ 4,86/MWh, R\$ 0,69/MWh e R\$ 0,04/MWh, respectivamente. A UTE a óleo diesel teve seu ICB aumentado em R\$ 1,28/MWh. Identificou-se que o benefício dos reservatórios de regularização e o impacto da emissão de particulados apresentaram as maiores alterações no preço final de energia de cada usina.

**Palavras-Chave:** Leilões de energia, externalidades, índice custo-benefício, hidrelétricas, termelétricas.

### 1 Introdução

O aumento da capacidade instalada de geração de energia no Brasil nos últimos anos se deu principalmente por meio de usinas hidrelétricas (UHEs) a fio d'água, usinas eólicas e termelétricas (UTES) a combustíveis fósseis. Poucas usinas hidrelétricas com capacidade de regularização foram instaladas e, assim, a capacidade de regularização do sistema elétrico foi se reduzindo nos últimos anos. Em 2001, a capacidade de regularização do SIN era de 6,27 meses; já em 2012, a capacidade de regularização do sistema havia contraído para 4,91 meses, o que representou uma queda de quase 25% [1]. Para 2021, a expectativa é de que seja registrada uma perda ainda mais significativa da capacidade de regularização do sistema, atingindo 3,35 meses.

Ocorre que o aumento da geração por fontes variáveis (hídrica a fio d'água, eólica e solar) ocasiona uma necessidade de geração de base que, caso não seja atendida por usinas hidrelétricas com capacidade de regularização, deve ser suprida por usinas termelétricas. Nesse caso, a consequência é o aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEE) e a elevação do custo de geração de energia. Esse maior custo, por sua vez, seria inevitavelmente repassado às tarifas pagas pelo consumidor final, impactando assim a competitividade do país, já que a energia elétrica é o principal insumo energético utilizado por 79% das empresas nacionais, podendo representar mais de 40% de seus custos de produção [2].

Em estudo recente, Bertone et al. [3] mostraram que 61% da capacidade instalada nacional é composta por usinas hidrelétricas que operam a fio d'água. Tal característica, aliada à situação hidrológica desfavorável, em especial à crise hídrica que vem ocorrendo na última década, levou à necessidade de intensificação do acionamento termelétrico, com grande impacto no preço da energia elétrica para o consumidor final. Esse aumento causou grandes prejuízos

para a cadeia produtiva brasileira, afetando todos os setores da sociedade. De fato, de 2013 a 2017, o custo aumentou 48,2%, com pico em 2015, atingindo 564,34 R\$/MWh [2].

Desde 2005, a expansão do parque gerador do Sistema Interligado Nacional (SIN) vem sendo realizada basicamente mediante leilões de energia realizados pelo governo. A seleção nesses leilões é feita com base no Índice de Custo Benefício (ICB), em R\$/MWh, de cada empreendimento de geração. O ICB é definido como a razão entre o seu custo total e o seu benefício energético, sendo o benefício energético de um novo empreendimento de geração correspondente legalmente à sua Garantia Física (GF), que é calculada à época do seu leilão, aplicando a metodologia da Portaria MME nº 303 [4]; e o custo total definido a partir do preço de venda da energia ofertado no leilão de energia que, por sua vez, é definido de forma a viabilizar economicamente o empreendimento considerando o custo de investimento, incluindo os custos socioambientais para aplicação das medidas mitigadoras e programas ambientais definidos no processo de licenciamento, os juros durante a construção e a parcela fixa dos custos de operação e manutenção (O&M), somado ao valor esperado do custo variável de O&M e ao valor esperado do custo econômico de curto prazo.

Uma vez calculados os valores de ICB para cada projeto, o critério de decisão consiste em investir nos projetos por ordem de mérito crescente, ou seja, do menor para o maior valor de ICB. Dessa forma, os empreendimentos com menor custo esperado por MW de GF são considerados melhores e são favorecidos nos leilões.

Tudo isso torna os leilões de energia altamente eficazes na agregação de energia assegurada (GF) ao menor custo. Porém, Hochstetler [5] afirma que isso não se traduz necessariamente na minimização do custo global de suprimento. O autor verificou que a expansão promovida por meio dos leilões de energia revelou desequilíbrios estruturais crescentes, ou seja, ao negligenciar outros aspectos relevantes das usinas, como sua localização geográfica, sua flexibilidade operacional para atender a demanda e sua complementaridade com relação às demais usinas do sistema, os leilões de energia acabam promovendo uma expansão subótima.

Além disso, entende-se que a expansão do sistema não obedece ao princípio de desenvolvimento sustentável, pois externalidades ligadas a impactos negativos e benefícios socioambientais das diferentes fontes de energia não são considerados na definição dos vencedores. Como a produção de energia elétrica utiliza recursos naturais como insumos e provoca impactos sobre o meio ambiente e a sociedade, é necessário considerar estratégias sustentáveis na expansão do parque gerador, promovendo, assim, a melhoria das condições de vida da geração atual, evitando o comprometimento dos recursos a serem disponibilizados para gerações futuras.

Propõe-se, portanto, que a composição do ICB passe a considerar os benefícios das diferentes fontes de geração de energia para o sistema, para a sociedade e para o meio ambiente, bem como assumir os custos adicionais que gerarem para o sistema, custos de geração para o investidor,

custos de transmissão e distribuição da energia gerada, custos das fontes necessárias para a confiabilidade e as externalidades ambientais. Esta opção permite selecionar os projetos que otimizam o sistema como um todo (face à otimização apenas do preço de geração no modelo atual) e expandir a oferta de acordo com uma combinação ótima para a matriz elétrica.

Assim, o objetivo deste trabalho é estabelecer critérios, parâmetros, variáveis e equações para valoração de cinco das externalidades atualmente desconsideradas na composição dos ICBs de fontes geradoras de energia: i) o benefício dos reservatórios de acumulação das UHEs para o SIN; ii) o benefício das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) para o sistema; iii) o impacto à saúde humana ocasionado pela emissão de material particulado inalável; iv) o impacto da emissão de gases de efeito estufa; e v) o benefício da compensação ambiental. Destaca-se que na avaliação das externalidades são propostas metodologias ainda pouco utilizadas na literatura e que são aplicáveis a grande parte das usinas em operação do SIN. Em específico, do conhecimento dos autores, as propostas para as externalidades i) e ii) são inéditas. Todas são aplicadas em um estudo de caso com quatro usinas de diferentes fontes e que operam atualmente no SIN.

O restante do artigo está organizado da seguinte maneira: o item 2 apresenta uma revisão dos estudos mais relevantes no tema do artigo; o item 3 detalha as propostas metodológicas para a valoração das cinco externalidades; o item 4 mostra o estudo de caso, com subsequente obtenção dos parâmetros necessários para a valoração; o item 5 exibe os resultados das externalidades e seus impactos nos ICBs das usinas consideradas; por fim, o item 6 conclui o artigo e oferece recomendações para a continuidade dos estudos no tema.

## 2 Externalidades no contexto da geração e do mercado de energia elétrica: revisão dos principais estudos

Externalidades são entendidas como consequências decorrentes de processos de produção ou consumo que afetam terceiros [6]. Tais consequências podem ser positivas ou negativas dependendo do âmbito considerado. Esse tipo de efeito está presente na geração de energia elétrica de diferentes fontes. Para hidrelétricas, a Eletrobras [7] elenca perdas na biodiversidade em geral, perdas de benefícios provenientes de algumas atividades econômicas (irrigação, pesca, produção agrícola etc.), danos sobre os recursos culturais, históricos e minerais encontrados no meio ambiente e benefícios provenientes da criação de uma área de lazer como o lago do reservatório. Para termelétricas, são citados os danos causados à saúde humana decorrentes de emissões atmosféricas de óxido de enxofre e material particulado e as emissões de dióxido de carbono, que contribuem para o aumento do aquecimento global da atmosfera. Ferreira [8] considerou ainda para as hidrelétricas: alterações climáticas em regime de ventos e temperaturas; efeitos sobre a saúde humana e emissões de gases de efeito estufa (em particular, metano); e a inter-relação entre reservatórios e doenças associadas à água.

Wang et al. [9] consideraram em seus estudos, como as externalidades negativas mais relevantes, a perda de

biodiversidade e degradação da qualidade da água, além de outras como sedimentação do reservatório, erosão do solo, produção de matéria orgânica etc. Além das externalidades negativas, os autores [9] consideraram potenciais externalidades positivas oriundas de projetos de geração de energia, além da própria geração elétrica que, por outro lado, em muitas das vezes podem ser conflitantes com a função objetivo de geração de energia, tais como: regularização do regime de fluxo dos rios; implantação de sistemas de irrigação; potencial desenvolvimento de piscicultura etc.

Dadas as questões anteriormente citadas, diversos trabalhos têm procurado valorar as externalidades ligadas à geração hidrelétrica no Brasil e no Mundo. A valoração destes efeitos varia grandemente com a metodologia de levantamento utilizada. Ferreira [8] avaliou somente as externalidades negativas do setor hidrelétrico no Estado de Minas Gerais, chegando a um valor máximo de cerca de R\$ 20,00/MWh. Reis [10] comparou os custos ambientais (externalidades negativas) da geração hidrelétrica e termelétrica a gás natural em poucos casos específicos no Brasil, chegando a valores máximos da ordem de R\$ 7,00/MWh para hidrelétrica e de R\$ 13,00/MWh para termelétrica. Tajziehchi et al. [11] avaliaram as externalidades negativas para uma hidrelétrica com reservatório no Irã, chegando a U\$ 164/MWh. Wang et al. [9] consideraram um balanço de externalidades negativas e positivas para uma província da China, chegando a um valor médio de U\$ 12,41/MWh (convertido em dólar set./21), enfatizando a necessidade de implementação de métodos compensatórios, como pagamento por serviços ambientais, para desenvolvimento sustentável da geração hidrelétrica.

Em outro caso específico brasileiro, Ferreira et al. [12] estimaram a perda de produção agropecuária nos municípios parcialmente inundados pela usina hidrelétrica de Aimorés, situada no Estado de MG. No caso específico das externalidades agropecuárias, verifica-se que caso a área municipal alagada por um reservatório de uma usina hidrelétrica seja muito pequena, como ocorre no caso da UHE Aimorés, o valor do impacto também será pequeno. Todavia, em municípios onde o percentual municipal inundado é significativo, a externalidade não pode ser desconsiderada.

Ainda no SEB, Carvalho [6] teceu as bases conceitual e prática de uma metodologia para mensuração e incorporação de questões socioambientais em projetos de energia elétrica, com ênfase às externalidades, assim como sua aplicação a um estudo de caso, para uma linha de transmissão aérea, demonstrando os benefícios e potencialidades da metodologia.

Utilizando dados históricos, Pereira [13] avaliou se a internalização de custos externos alteraria as decisões de investimentos no passado e calculou o custo social das opções realizadas, concluindo que a inclusão das externalidades pode alterar a opção energética preferencial e que a visão de oferta de energia como produto pode conduzir a custos sociais maiores no presente e no futuro. A oferta de energia como serviço, com a inclusão das externalidades, tende a incentivar a busca dos melhores resultados nas dimensões econômica, social e ambiental.

Apesar de os estudos citados já terem estudado metodologias para valoração das externalidades da geração de energia elétrica, ainda permanece o desafio de adaptar essas metodologias para o sistema de contratação do SEB, ou seja, nos leilões de energia. Nesse ínterim, dois trabalhos merecem destaque: Bezerra et al. [14] apresentaram uma proposta para os leilões de energia com uma sistemática para leilões multiprodutos que permitissem uma comparação de fontes com distintos atributos e a realização de certames segregados, objetivando resultados coerentes com os custos da expansão e operação dos sistemas de geração e transmissão. Essa proposta foi implementada em um software de simulação, apresentado no estudo de Medeiros et al. [15].

### 3 Metodologia proposta

Com os estudos comentados até aqui, entende-se que lacunas ficaram pendentes para outras externalidades da geração de energia aplicada ao cálculo do ICB para trazer transparência ao certame de contratação de energia e permitir uma expansão ótima que atenda aos princípios de modicidade tarifária, confiabilidade de fornecimento e desenvolvimento sustentável.

Neste artigo, avaliaram-se cinco externalidades: i) benefícios dos reservatórios de regularização, ii) capacidade de atendimento à demanda por PCHs, iii) impacto da emissão de material particulado na saúde humana, iv) impacto da emissão de gases de efeito estufa; e v) benefício da compensação ambiental. Nos próximos itens são apresentadas as formas de valoração das externalidades consideradas.

#### 3.1 Valoração dos benefícios dos reservatórios de regularização para o SIN

Para a valoração do benefício dos reservatórios de regularização para o SIN, considera-se nos cálculos que a UHE com a capacidade de regularização opera a fio d'água, ou seja, é desconsiderado que a usina dispõe de um volume útil. Assim, a vazão excedente à vazão turbinada seria simplesmente vertida e gerar-se-ia mensalmente apenas com a vazão instantânea que chega no ponto de captação.

Assim, considerando que o SIN contrata a garantia física das usinas para atender à demanda, nos meses em que a UHE simulada como uma usina a fio d'água não conseguir gerar a garantia física, seria necessário o acionamento de usinas térmicas para suprir o déficit.

Inicialmente, determinam-se as vazões mensais para o cálculo da energia. Na análise, utiliza-se o período crítico do sistema, de 1949 a 1955, uma vez que a garantia física das UHEs considera esse período para o cálculo [16]. Sabe-se que há evidências de que o período crítico do sistema esteja se alterando para o momento contemporâneo [35], contudo o período de 1949 a 1956 ainda é utilizado nos modelos vigentes. Em seguida, calcula-se a energia média mensal nesse período, considerando: a vazão turbinada pela casa de força principal e pela casa de força secundária, se existir,

descontando a vazão sanitária e a vazão que seria vertida na simulação da UHE operando a fio d'água.

Os valores de energia média mensal abaixo da garantia física da usina nesse período são considerados déficit e a valoração do custo para suprir esse valor é calculada por meio da curva de ordem de mérito das termelétricas do SIN. A curva é obtida utilizando dos dados de potência instalada (em MW) e respectivo custo de geração (em R\$/MW) das termelétricas que compõem o parque térmico do SIN. Isso representa o custo que seria evitado no caso da UHE analisada operar com reservatório com capacidade de regularização, sugerindo o seu desconto no custo da energia contratada no leilão de energia.

### 3.2 Valoração da capacidade de atendimento à demanda por PCHs

O benefício das UHEs com capacidade de armazenamento que permite estocar água nos períodos chuvosos em seus reservatórios e gerar energia nos períodos secos pode ser potencializado com a geração de energia a partir de usinas hidrelétricas a fio d'água, como é o caso das PCHs que estão espalhadas por todo território nacional. As PCHs podem gerar energia de baixo custo nos períodos chuvosos, atender a parte da demanda e, dessa forma, pode-se priorizar o armazenamento da água nos reservatórios das UHEs aumentando a confiabilidade global de fornecimento. Dessa forma, o acionamento das termelétricas a combustível fóssil, que são caras e poluentes, pode ser significativamente reduzido.

As PCHs que são comercializadas nos leilões de energia geralmente oferecem uma energia menor do que sua real capacidade de geração. Algumas PCHs vendem parte desse excedente de energia no Mercado Livre, mas eventualmente acaba ocorrendo uma sobra de energia. Essa energia excedente à quantidade contratada efetivamente entra no sistema e ajuda no atendimento à demanda, promovendo os benefícios comentados anteriormente. Entretanto, esse benefício não é considerado ou contabilizado nos leilões de energia realizados atualmente.

Para a valoração desse benefício das PCHs para o SIN, calcula-se a energia média gerada pela PCH simulada para todo o período histórico da sua série de vazões, limitando à vazão máxima turbinada de projeto, com o excesso sendo vertido. A energia excedente à garantia física foi denominada de superávit e valorada pelo valor médio do preço de liquidação das diferenças (PLD). Os meses com geração de energia abaixo da garantia física foram descontados.

### 3.3 Valoração do impacto da emissão de material particulado na saúde humana

Material particulado (MP) é qualquer substância que existe como líquido ou sólido na atmosfera (à exceção de água pura) e possui dimensões microscópicas ou submicroscópicas, mas maiores que as dimensões moleculares. Os MPs com diâmetro menor que 10  $\mu\text{m}$  (PM-10) são aqueles que causam maiores efeitos nocivos à saúde humana.

A emissão de materiais particulados foi identificada por [19] como o principal poluidor responsável por doenças cardiopulmonares e mortes prematuras. No setor de energia elétrica, as principais fontes de emissão de MP são as usinas termelétricas a carvão mineral e a bagaço de cana. Esses poluentes são transportados pelo vento e vão sendo depositados ao longo da região no entorno da atividade de geração de energia elétrica.

A metodologia empregada é denominada IPA (*Impact Pathway*), adaptada de Bickel e Friedrich [19] por Tolmasquim et al. [20], objetiva rastrear o poluente desde o local de emissão até atingir o seu receptor, por meio de quatro etapas: i) Emissão: refere-se à taxa de emissão do poluente pela fonte geradora, que depende da tecnologia a ser avaliada; ii) Dispersão: calcula-se a dispersão e concentração do poluente emitido na região do receptor analisado; iii) Impacto: com o aumento da concentração do poluente na região do receptor, calcula-se o efeito cumulativo provocado por sua exposição e o seu impacto utilizando a função dose-resposta (explicada a seguir); iv) Custo: estabelecer formas de valorar o impacto em termos econômicos.

A função dose-resposta é utilizada para fornecer uma relação entre a concentração do poluente que afeta o receptor e o impacto físico exercido. Esse tipo de função é muito utilizado em estudos epidemiológicos, que relacionam, por exemplo, a ocorrência de doenças com a variação da concentração de determinado poluente na atmosfera. Os efeitos dos materiais particulados emitidos pelos empreendimentos geradores de energia elétrica são equivalentes aos efeitos dos nitratos aerossóis [19]. Assim, utilizaram-se os coeficientes dose-resposta de morbidade (doenças respiratórias) devido à emissão de nitrato aerossol obtidos de Friedrich et al. [21].

Para os cálculos de dispersão, utilizou-se o Modelo de Pluma Gaussiana, que é válido apenas para dispersões em escala local, de até 50 km. Os materiais particulados se depositam em regiões com até 50 km de distância da fonte emissora e tem efeitos quimicamente estáveis, sendo por esses motivos considerados poluentes primários [22].

O valor econômico da mortalidade foi determinado por meio da metodologia proposta por Narain e Sall [23], que utiliza o valor da vida estatística (*Value of Statistical Life – VSL*), obtido por meio de transferência unitária de valor com ajuste para a renda a partir de um valor de referência publicado pela OCDE. Já o valor econômico da morbidade foi calculado pelo método do custo de doença (CD), no qual os gastos incorridos em bens substitutos servem para evitar uma alteração no estado de saúde [10]. Para isso, determinam-se os custos incorridos com internações, medicamentos, tratamentos, entre outros bens e serviços, no intuito de remediar os efeitos causados na saúde pela inalação de material particulado. Entretanto, esse valor não representa a verdadeira disposição a pagar das pessoas para reduzir os riscos de doença respiratória, uma vez que não contabiliza gastos preventivos, sofrimentos, perdas associadas aos sintomas, dores etc. [24]. Na teoria econômica, a noção de dano ou benefício, baseada na preferência dos indivíduos (ou do consumidor), manifesta-se no mercado por meio dos conceitos de disposição a pagar para evitar uma perda (dano)

ou para obter um bem (benefício) [10]. Assim, o valor para morbidade mais correto é maior do que o valor resultado do método do custo de doença. Motta et al. [25] afirmam que a relação entre a disposição a pagar e o custo de doença está entre 1,3 e 2,4. Dessa forma, recomenda-se adotar o valor médio de 1,85 como fator de correção.

Por fim, multiplica-se o risco coletivo obtido de morbidade e de mortalidade pelas respectivas valorações e, somando-se os dois valores calculados, obtém-se o valor do impacto à saúde humana causado pela emissão de material particulado por kWh.10<sup>-3</sup>.

### 3.4 Valoração do impacto da emissão gases de efeito estufa

Os principais gases causadores do efeito estufa são: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e clorofluorcarbonetos (CFCs). As termelétricas emitem esses gases no processo de queima de combustível. As emissões já são muito conhecidas e as suas respectivas taxas de emissão e avaliação do impacto ambiental são análises sempre requeridas pelos órgãos ambientais governamentais para emissão das licenças ambientais. Para este trabalho, são utilizados os valores obtidos por Miranda [26].

Para hidrelétricas, as emissões de gases de efeito estufa estão diretamente relacionadas aos seus reservatórios e ocorrem devido a dois fatores: i) por certos materiais inorgânicos que reagem quimicamente consumindo oxigênio (O<sub>2</sub>) e liberando CO<sub>2</sub>; e ii) pela decomposição anaeróbica e aeróbica de biomassa que existia na área alagada pelo reservatório e da matéria orgânica que passa a se formar e se depositar devido à alteração do ambiente lótico para lântico<sup>1</sup> do rio. Para estimar essas emissões, é utilizada a metodologia apresentada pelo IPCC [27], com as constantes utilizadas pela EPE [28].

### 3.5 Valoração do benefício da compensação ambiental

A compensação ambiental é um mecanismo financeiro de compensação pelos efeitos de impactos não mitigáveis ocorridos quando da implantação de empreendimentos identificados no processo de licenciamento ambiental. Os recursos são destinados às Unidades de Conservação para a consolidação do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC).

O cálculo da compensação ambiental é regulamentado pelo Decreto nº 4340 [29]. Segundo o regulamento, o valor está diretamente relacionado com os investimentos necessários para implantação do empreendimento. Como o investimento por kW instalado é alto para hidrelétricas e menor para termelétricas, é produzido um benefício para o meio ambiente e sociedade maior pela compensação ambiental das hidrelétricas, mas que acaba diminuindo a competitividade desse tipo de empreendimento com relação

às UTEs, já que encarece ainda mais o custo para sua instalação.

Nos leilões de energia da EPE são fornecidos os valores de investimento necessário para implantação dos empreendimentos e o valor da compensação ambiental é calculado no processo de licenciamento ambiental, geralmente após a emissão da Licença Prévia. Portanto, os dados são públicos e podem ser calculados para internalizar esse benefício no ICB dos empreendimentos.

Para o cálculo do Benefício da Compensação Ambiental ( $B_{CA}$ ), em R\$/MWh, propõe-se neste estudo a Equação (1),

$$B_{CA} = \frac{Ca}{GF \cdot T} \quad (1)$$

onde  $Ca$  é o valor da compensação ambiental (R\$),  $GF$  é a garantia física ofertada no leilão de energia (MWh méd.) e  $T$  a duração do contrato do fornecimento de energia (h).

## 4 Estudo de caso

As propostas de valoração das cinco externalidades apresentadas foram aplicadas em um estudo de caso que considerou quatro tipos de empreendimentos: i) UHE com capacidade de regularização; ii) PCH com operação a fio d'água; iii) UTE a gás natural; e iv) UTE a óleo combustível. Para obter os dados necessários, optou-se por escolher empreendimentos que tiveram sua energia comercializada em leilões e que, portanto, dispõem de dados públicos. A Tabela 1 exibe as usinas selecionadas.

Para os dados de inventário da UHE e das UTEs, foi utilizado o *deck* de preços do modelo Newave referente a março de 2020 [17]. Isso inclui a série de vazões médias mensais afluentes à UHE Mauá e os custos dos combustíveis das UTEs que compõem o sistema. Para os dados da PCH Bela Vista, consultou-se o projeto básico [30].

### 4.1 Benefício do reservatório de regularização da UHE Mauá

Na valoração do benefício do reservatório de regularização, a curva de ordem de mérito das UTEs foi construída a partir da ordenação crescente dos custos de geração e subsequente associação com as potências acumuladas das respectivas UTEs. O ajuste ao gráfico de uma equação exponencial resultou em um coeficiente de determinação de 0,975 (Figura 1), o que confirma a boa qualidade do ajuste.

A equação obtida pelo ajuste da curva de ordem de mérito, calcula o custo de geração  $C$  para um dado valor de potência  $P$ . Para obter o custo marginal de operação mensal ( $CM$ ) a equação ajustada foi derivada, resultando na Equação (2).

$$CM = 0,0064e^{(0,00016P)} \quad (2)$$

<sup>1</sup> Ambiente lótico refere-se aos corpos hídricos com fluxo constante, enquanto o ambiente lântico é caracterizado por águas paradas e sem correntes, como reservatórios e lagoas.

Tabela 1: Empreendimentos selecionados para o estudo de caso.

Dados	UHE Mauá	PCH Bela Vista	UTE Escolha	UTE Viana
Localização	Telêmaco Borba (PR)	Verê (PR)	Cariacica (ES)	Viana (ES)
Rio/Combustível	Tibagi	Chopim	Gás Natural	Óleo combustível B1 (alternativo: óleo diesel)
Volume útil (hm)	664	0	-	-
Área do reservatório (ha)	9.930	236	-	-
Potência Instalada (MW)	361	29	337,56	170,76
Garantia Física (MWméd.)	197,7	16,64	194,1	121,5
Leilão (tipo)	04/2006 (A-5)	03/2018 (A-6)	03/2008 (A-5)	02/2007 (A-3)
Preço leilão corrigido (R\$/MWh)	220,88	195,70	258,08	252,34

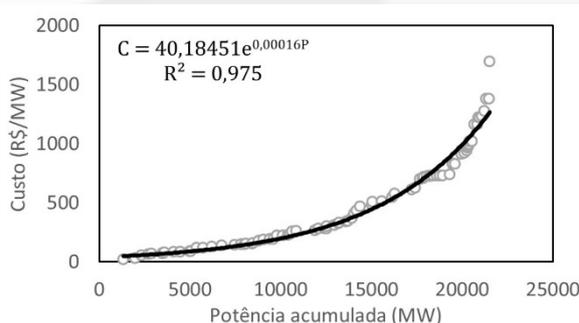


Figura 1: Curva de ordem de mérito das UTEs do SIN (ref.: março/2020).

Aplicando-se o déficit médio mensal de energia da UHE Mauá nessa equação, obtêm-se a valoração do benefício em R\$/MW e multiplicando-se por 720 horas (1 mês), é obtido o valor final em R\$/MWh.

A série de energias geradas no período entre 1949 e 1956 calculadas considerando a UHE Mauá como operando a fio d'água é mostrada na Figura 2.

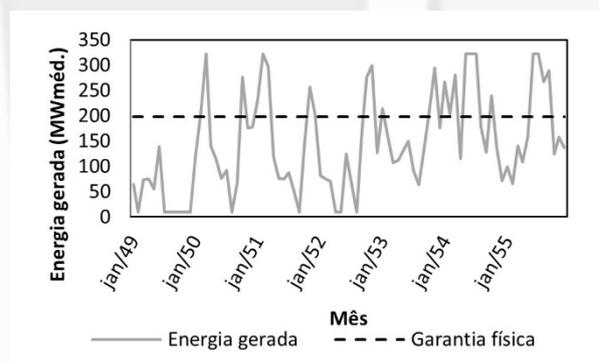


Figura 2. Simulação da energia gerada pela UHE Mauá operando a fio d'água durante o período crítico do SIN.

Os valores gerados abaixo da garantia física representam o déficit, que resultou em 75,6 MWméd. Aplicando-se esse valor na Equação (2), resulta em R\$ 0,00651/MW ou, R\$ 4,69/MWhmês, que representa o custo que seria evitado no caso de existir o reservatório com capacidade de regularização da UHE Mauá, sugerindo o seu desconto no custo da energia contratada no leilão de energia.

#### 4.2 Benefício da capacidade de atendimento à demanda da PCH Bela Vista

Para a valoração desse benefício das PCHs para o SIN, calculou-se a energia média gerada pela PCH Bela Vista para todo o período histórico da sua série de vazões. A energia gerada total por mês é a soma das energias geradas pelas casas de força principal e secundária. O resultado é apresentado na Figura 3.

Na Figura 3, foi traçada a energia gerada mensalmente pela PCH Bela Vista e a sua garantia física (16,64 MWméd.). A energia gerada é limitada superiormente pelo valor correspondente ao turbinamento máximo de projeto, com o excedente da vazão sendo vertido. Os valores acima da garantia física representam um superávit que, efetivamente, é gerado e alivia a demanda do sistema.

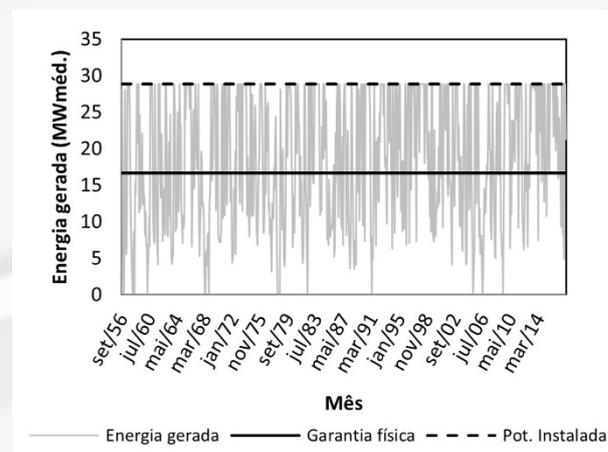


Figura 3. Simulação da energia gerada pela PCH Bela Vista.

Para o cálculo do superávit mensal de energia, foi descontada a garantia física da PCH de sua energia gerada mensal e, posteriormente, foi calculado o superávit médio mensal do período, somando os resultados para cada mês do período e dividindo pelo seu número de meses. O resultado foi de 4,95 MWmédios. Em seguida, foi calculada a energia média mensal gerada abaixo da garantia física, que resultou em 3,05 MWmédios, que foi descontada do superávit calculado. Assim, o resultado utilizado para valoração foi de 1,91 MWmédios.

A valoração desse benefício energético considerou o valor médio do histórico completo (maio/2003 a março/2020) do PLD para o submercado Sul (em que se encontra a PCH) de R\$ 168,04/MWh [18]. Assim, o benefício resultante foi de R\$ 0,45/MWh para o SIN, sugerindo o seu desconto no custo da energia contratada no leilão de energia.

### 4.3 Impacto ocasionado pela emissão de material particulado da UTE Viana

Este quesito foi considerado apenas para a UTE Viana, pois UHEs não emitem material particulado e UTEs movidas a gás natural com ciclo combinado emitem uma quantidade desprezível de material particulado [28].

A emissão de material particulado PM10 da UTE Viana foi obtida do seu Estudo de Impacto Ambiental e totaliza 0,68 g/s por motor. Cada motor da usina possui 8730 kW de potência. Assim, o valor obtido de emissão de material particulado PM10 para a UTE Viana foi de 0,28 g/kWh.

Inicialmente, foi calculada a dispersão do material particulado, para obter a sua concentração no nível do solo para as 10 distâncias discretizadas a cada 5 km, utilizando o Modelo de Pluma Gaussiana descrito anteriormente. Em seguida, determinou-se o impacto à saúde humana, por meio da aplicação da função dose-resposta, que resulta no risco individual. Para esse estudo, de forma a obter resultados mais otimistas, foi utilizado o coeficiente dose-resposta baixo, igual a 60.

Para o cálculo do risco coletivo considerou-se a faixa de baixa intensidade, já que o município de Viana, onde está localizada a UTE Viana, possui 0,24 hab./km<sup>2</sup>, obtendo-se o risco coletivo de morbidade de  $0,002 \times 10^{-3}$ , que representa o número de doenças por kWh associado à emissão de particulados pela UTE Viana.

O próximo passo é calcular o número de óbitos por kWh. Para isso, é necessário determinar a relação entre os casos de doenças respiratórias, considerados igual ao número de internações devido às doenças respiratórias, e o número de óbitos correspondentes, com dados obtidos do DataSUS [31]. A relação calculada é de 0,08279 e, multiplicando pelo número de doenças por kWh calculado acima, resulta em  $0,013 \times 10^{-5}$  o número de óbitos por kWh associados à geração de energia elétrica pela termelétrica em análise.

Por fim, para calcular o valor do impacto à saúde humana em termos econômicos, em R\$/kWh, é necessário determinar o valor econômico da mortalidade e da morbidade. Como explicado anteriormente, o valor econômico da mortalidade foi determinado utilizando o VSL. Para a transferência unitária de valor com ajuste para a renda do VSL, utilizou-se como referência o VSL publicado em [32], com valor base de 2005 de US\$ 3 milhões. Para a atualização desse valor, consideraram-se índices de inflação, PIB per capita e elasticidade de renda do VSL, de acordo o método proposto em [23]. Assim, obteve-se o VSL de US\$ 2.304.948,31 para o Brasil, a preços de 2018 ou R\$ 10.141.772,57, utilizando o dólar a R\$ 4,40. O VSL final é expresso em valores de 2018 devido à disponibilidade de dados.

O valor econômico da morbidade foi calculado pelo método do custo de doença - CD, com os dados necessários para o cálculo obtidos do DataSUS [31] e IBGE [33]. O valor obtido para o CD, após aplicado o fator de correção de 1,85, foi de R\$ 12.381,73, ou seja, a disposição a pagar para diminuir os riscos com doenças respiratórias.

Obtidos o valor de morbidade e o valor da vida estatística, é possível calcular o valor do impacto à saúde humana causado pela emissão de material particulado por kWh de empreendimentos de geração de energia elétrica, que resultou em R\$ 1,27/kWh para a UTE Viana.

### 4.4 Impacto causado pela emissão de GEEs para as usinas consideradas

A valoração do impacto de emissão de GEEs envolve determinar as taxas de emissão por kWh. Considerando os métodos aqui adotados, os valores que se aplicam às térmicas em estudo, UTE Viana (movida a óleo combustível) e UTE Escolha (movida a gás natural), são 781,14 e 518,11 gCO<sub>2</sub>eq/kWh, respectivamente. Por sua vez, as emissões de GEE da UHE Mauá e da PCH Bela Vista resultaram em 130,88 e 36,96 gCO<sub>2</sub>eq/kWh.

Aplicando-se o valor do SC-CO<sub>2</sub> de US\$ 42 para as emissões de CO<sub>2</sub> equivalentes obtidas e utilizando o dólar a R\$ 4,40, obtiveram-se os valores finais apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Emissões de CO<sub>2</sub> equivalente e valoração do impacto ambiental dos empreendimentos em estudo.

	UHE Mauá	PCH Bela Vista	UTE Escolha	UTE Viana
gCO <sub>2</sub> eq/kWh	130,88	36,96	518,11	781,14
R\$/MWh	0,024	0,007	0,096	0,144

### 4.5 Benefício da compensação ambiental das usinas consideradas

O benefício da compensação ambiental foi calculado utilizando a Equação (1). O valor da compensação ambiental é calculado pelo órgão ambiental licenciador e sua metodologia utiliza uma série de parâmetros para avaliar o grau de impacto sobre a biodiversidade, áreas prioritárias e unidades de conservação, incluindo índices de magnitude, biodiversidade, abrangência e temporalidade. Entretanto, o valor não pode exceder 0,5% do investimento total da usina. Dessa forma, devido a não ser possível obter o valor exato de compensação ambiental dos empreendimentos em estudo, considerou-se o valor correspondente a 0,5% do investimento total da usina, obtido das planilhas de resultado dos leilões de energia de que cada empreendimento participou, atualizado pelo índice IGP-M. A duração do contrato de fornecimento, conforme o Edital de seus respectivos leilões, é de trinta anos para hidrelétricas e quinze anos para as termelétricas. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Valoração do benefício da compensação ambiental dos empreendimentos em estudo.

	UHE Mauá	PCH Bela Vista	UTE Escolha	UTE Viana
MM R\$	8.831	910	5.665	3.660
R\$/MWh	0,17	0,21	0,22	0,23

## 5 Resultados e discussão

O resultado dos impactos e benefícios valorados neste trabalho são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados obtidos da Valoração dos impactos e benefícios das usinas estudadas em R\$/MWh.

	UHE Mauá	PCH Bela Vista	UTE Escolha	UTE Viana
Reservatório de regularização da UHE	-4,69	0,00	0,00	0,00
Atendimento à demanda da PCH	0,00	-0,45	0,00	0,00
Emissão de material particulado	0,00	0,00	0,00	1,27
Emissão de GEEs	0,02	0,01	0,10	0,14
Compensação ambiental	-0,20	-0,25	-0,13	-0,14
<b>Total</b>	<b>-4,86</b>	<b>-0,69</b>	<b>-0,04</b>	<b>1,28</b>

Os valores negativos representam decréscimo no valor do ICB dos leilões de energia, ou seja, esses valores diminuiriam o preço final da energia da usina, tornando-a mais competitiva. Em contrapartida, os valores positivos representam acréscimos no valor do ICB, tornando sua energia mais cara.

A Tabela 5 compara o valor final do ICB praticado nos leilões que as usinas estudadas venderam suas energias, corrigido pelo IPCA, com o valor acrescido dos impactos e benefícios valorados neste trabalho.

Tabela 5: Comparação dos impactos e benefícios valorados com os preços corrigidos dos leilões de energia.

	Preço original de leilão (R\$/MWh)	Preço com as externalidades valoradas (R\$/MWh)	Variação (%)
UHE Mauá	220,88	216,02	-2,20
PCH Bela Vista	195,70	195,01	-0,35
UTE Escolha	258,08	258,05	-0,01
UTE Viana	252,34	253,62	+0,51

Entre as externalidades avaliadas, o benefício proporcionado pelos reservatórios de acumulação das UHEs representa o maior valor, de 4,69 R\$/MWh, evidenciando a importância deles para a confiabilidade do fornecimento e modicidade tarifária. Há ainda a redução do impacto de emissões de material particulado PM10 e de GEE que seriam gerados com o acionamento de termelétricas para suprir a demanda energética quando os reservatórios estão sem capacidade, os quais não foram considerados no cálculo.

O impacto da emissão de material particulado inalável PM10 representou o segundo maior valor valorado, de 1,27 R\$/MWh, que representa um acréscimo no ICB da UTE Viana. Esse valor busca internalizar o custo devido às doenças cardiopulmonares que o SUS precisa arcar e o custo das vidas perdidas que são afetadas pelas emissões desses poluentes.

O benefício das PCHs para o sistema, que nesse estudo foi avaliado apenas com a energia gerada além da garantia física ofertada no leilão, também apresentou valor significativo, de 0,45 R\$/MWh. Existe ainda uma série de externalidades das PCHs que produzem benefícios e impactos negativos para o SIN, sociedade e meio ambiente que já foram levantadas por outros trabalhos, mas a sua incorporação no ICB dos leilões de energia permanece um desafio para estudos futuros. O trabalho de Roland Berger Strategy Consultants [34] destaca a criação de empregos, a geração de receita tributária, o impacto no PIB, o aumento do Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDH-M) onde são instaladas, a redução de investimentos adicionais nas redes de transmissão, a complementaridade com outras fontes renováveis, entre outros.

O impacto das emissões de GEE apresentou valores menores quando comparado com as demais externalidades. Para as usinas de fonte hídrica, UHE Mauá e PCH Bela Vista, o valor desse impacto é quase insignificante, de 0,02 e 0,01 R\$/MWh respectivamente, já que as emissões provocadas pelos reservatórios são muito pequenas. Por outro lado, para as termelétricas, esse valor é maior, com 0,10 R\$/MWh para a UTE Escolha e 0,14 R\$/MWh para a UTE Viana, devido ao maior impacto das emissões de GEE em razão da queima de combustível fóssil.

Por fim, o benefício da compensação ambiental, como esperado, apresentou valores maiores para a UHE Mauá e PCH Bela Vista, de 0,20 R\$/MWh e 0,25 R\$/MWh respectivamente, que possuem um custo de investimento para sua instalação maior. A UTE Escolha e a UTE Viana apresentaram a valores menores, de 0,13 R\$/MWh e 0,14 R\$/MWh respectivamente, cerca da metade do valor estimado para as usinas de fonte hídrica.

Os resultados apresentados são condizentes com os estudos de valoração das externalidades realizados no Brasil. Conforme apresentado anteriormente, Ferreira [8] chegou a um valor máximo de cerca de R\$ 20,00/MWh avaliando somente as externalidades negativas do setor hidrelétrico no Estado de Minas Gerais e Reis [10] chegou a valores máximos da ordem de R\$ 7,00/MWh para hidrelétrica e de R\$ 13,00/MWh para termelétrica a gás natural.

## 6 Conclusões

Os leilões de compra de energia no ambiente de contratação regulada consideram apenas o preço de geração, não sendo contabilizadas as externalidades da geração que acabam impactando na tarifa de energia paga pelo consumidor final ou causando impactos negativos e benefícios para a sociedade e para o meio ambiente.

Com isso em mente, o objetivo principal deste trabalho foi estabelecer critérios, parâmetros, variáveis e equações para valoração de cinco externalidades atualmente desconsideradas na composição dos índices custo benefícios de fontes geradoras de energia, visando a analisar seus impactos nas negociações em leilões de energia elétrica. Delas, a de maior impacto positivo foi o benefício oferecido pela capacidade de regularização do reservatório estudado. Deve-se ressaltar, no entanto, que os resultados foram

obtidos por meio de uma simulação individual da UHE considerada, o que desconsidera a interação da usina com os demais empreendimentos do sistema. Uma simulação similar em termos de sistema poderia trazer variações no valor do benefício, as quais seriam ainda mais positivas caso o reservatório fosse considerado como alternativa de apoio para as fontes variáveis de geração, principalmente eólicas e solares.

Por outro lado, a externalidade de maior impacto negativo foi a emissão de material particulado pela térmica estudada. Note-se que é uma externalidade muito pouco considerada em estudos similares, o que se pode justificar pela dificuldade em seu processo de valoração. De fato, ela foi a externalidade que necessitou de mais informações, as quais foram coletadas de diferentes fontes. Portanto, reconhece-se a dificuldade em se valorar esse impacto. Ainda assim, o valor resultante mostrou que a emissão de material particulado é uma externalidade bastante relevante e que merece ser analisada em estudos futuros.

De um modo geral, as cinco externalidades estudadas se aplicam às principais fontes de geração de energia atualmente instaladas no país, o que evidencia a aplicabilidade e a reprodutibilidade das metodologias propostas. Destaca-se que os dados de entrada das equações utilizadas são aplicáveis para o sistema atual de contratação, ou seja, são dados dos empreendimentos originados dos seus respectivos cadastros nos leilões de contratação e de bancos de dados do governo. Dessa forma, é garantida a transparência e veracidade das informações.

Para trabalhos futuros, recomendam-se o estudo e o desenvolvimento de metodologias de valoração de outras externalidades já apontadas pela literatura. Por exemplo: questões de capacidade de armazenamento e atendimento às demandas média e de pico; aspectos relacionados à modicidade tarifária, como investimentos adicionais em redes de transmissão e complementaridade entre as fontes renováveis; e outras referentes ao desenvolvimento sustentável, como as receitas tributárias geradas por meio da arrecadação de impostos sobre os serviços prestados com a implantação, operação e manutenção das usinas de geração de energia elétrica, a geração de empregos diretos e indiretos, a segurança contra cheias promovida pelas hidrelétricas e seus reservatórios, a supressão e reposição florestal, dentre outros.

## Referências

- [1] Sistema FIRJAN. **A expansão das usinas a fio d'Água e o declínio da capacidade de regularização do sistema elétrico brasileiro**, 2013. Disponível em: <https://bit.ly/3iLCt11>. Acesso em: 20/07/2021.
- [2] Sistema FIRJAN. **Quanto custa a energia elétrica para a pequena e média indústria no Brasil?** 2017. Disponível em: <https://bit.ly/3Bq7Ae8>. Acesso em: 20/07/2021.
- [3] A. C. Bertone, M. L. Bueno, R. de P. T. Keppen, D. H. M. Detzel. Accumulation and Run-of-the-River Hydropower Plants: a case study of the Brazilian Hydroenergetic System. In: 38<sup>th</sup> IAHR World Congress, Panama City, Panama, 2019. doi:10.3850/38WC092019-1075
- [4] Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Portaria nº 303, de 18/11/2014**. Define os montantes da garantia física dos empreendimentos de geração de energia elétrica. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2014.
- [5] R. L. Hochstetler. Aprimoramento nos leilões de energia para fomentar a configuração ótima do parque gerador. In: XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Brasília (DF), 2013.
- [6] C. E. Carvalho. Desenvolvimento Procedimento e Métodos para Mensuração e Incorporação das Externalidades em Projetos de Energia Elétrica: Uma aplicação às Linhas de Transmissão Aéreas. Tese (Doutorado) — USP, 2005.
- [7] Eletrobras. Metodologia de valoração das externalidades ambientais da geração hidrelétrica e termelétrica com vistas à sua incorporação no planejamento de longo prazo do setor elétrico. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2000.
- [8] V. V. M. Ferreira. **Avaliação de externalidades do setor hidrelétrico no Estado de Minas Gerais**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.
- [9] G. Wang, Q. Fang, L. Zhang, W. Chen, Z. Chen, H. Hong, Valuing the effects of hydropower development on watershed ecosystem services: Case studies in the Jiulong river watershed, Fujian Province, China. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 86(3), p. 363–368, 2010.
- [10] M. de M. Reis. **Custos Ambientais Associados à Geração Elétrica: Hidrelétricas X Termelétricas a Gás Natural**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.
- [11] S. Tajziehchi, S. Monavari, A. Karbassi, S. Shariat, N. Khorasani. Quantification of social impacts of large hydropower dams - a case study of Alborz dam in Mazandaran Province, Northern Iran. **International Journal of Environmental Research**, 7(2), p. 377–382, 2013.
- [12] V. Ferreira, O. Branco, P. Fleming. Avaliação de externalidades agropecuárias na Usina Hidrelétrica de Aimorés. In: XXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte (MG), 2007.
- [13] C. A. A. Pereira. Energia como Serviço: Proposta de Reestruturação do Atendimento da Demanda Incluindo Externalidades. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- [14] B. Bezerra, L. A. Barroso, J. Rosenblatt, M. Carvalho, G. Cunha, M. Pereira, L. de Medeiros. Leilões multiproduto considerando os atributos das fontes de expansão: uma proposta para o setor elétrico brasileiro. In: XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica. Foz do Iguaçu (PR), 2014.
- [15] L. de Medeiros, D. H. M. Detzel, M. C. Coelho, B. Bezerra, M. R. M. Carvalho, J. Rosenblatt, M. V. Pereira. Simulação de leilões multiprodutos considerando os atributos das fontes de expansão. In: XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu (PR), 2015.
- [16] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Procedimentos de Rede, submódulo 7.7: Metodologia de

- cálculo da energia e da potência asseguradas de usinas despachadas centralizadamente. Revisão 0.3. 2018.
- [17] CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Deck de preços do modelo NEWAVE, março de 2020. 2020. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/ccee/documentos/NW202003>>. Acesso em: 20/07/2021.
- [18] CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Preços médios - PLD – Preço de Liquidação das Diferenças. 2020. Disponível em: <https://tinyurl.com/y74j2ntc>. Acesso em: 20/07/2021.
- [19] P. Bickel, R. Friedrich. **ExternE – externalities of energy. Methodology 2005 update.** Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung – IER, Universität Stuttgart, Germany, 2005. Disponível em: <https://bit.ly/3iDjTeC>. Acesso em: 20/07/2021.
- [20] M. T. Tolmasquim, R. S. da Motta, E. L. L. Rovere, M. M. de L. Barata, A. G. Monteiro. Environmental valuation for long-term strategic planning — the case of the brazilian power sector. **Ecological Economics**, 37(1), p. 39 – 51, 2001.
- [21] R. Friedrich, W. Krewitt, P. Mayerhofer. **ExternE – externalities of energy: oil and gas.** Vol. 4. IAEA, 1995. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20443742>. Acesso em: 20/07/2021.
- [22] M. T. Tolmasquim, R. S. da Motta, E. L. L. Rovere, M. M. de L. Barata, A. G. Monteiro. **Metodologias de Valoração do Meio Ambiente para o Setor Elétrico.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2000.
- [23] U. Narain, C. Sall. **Methodology for Valuing the Health Impacts of Air Pollution: Discussion of Challenges and Proposed Solutions.** World Bank: Washington - DC, 2016.
- [24] L. A. Alves. A valoração dos impactos ambientais associados à expansão da Matriz Elétrica Brasileira: proposta de instrumentos econômicos para a promoção das fontes alternativas e limpas. Dissertação (Mestrado) — UFMG 2009.
- [25] R. S. Motta, R. A. Ortiz, S. F. Ferreira. Avaliação econômica dos impactos causados pela poluição atmosférica na saúde humana: um estudo de caso para São Paulo. 1998. Disponível em: <https://bit.ly/3zxGWhS>. Acesso em: 20/07/2021.
- [26] M. M. de Miranda. Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida. Dissertação (Mestrado) — USP, 2012.
- [27] IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Vol. 4 – Agriculture, Forestry and Other Land use, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>. Acesso em: 20/07/2021.
- [28] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2007/2016 - Volume 1. Brasília, 2007.
- [29] Brasil. **Decreto nº 4.340, de 22/08/2002.** Regulamenta artigos da Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, que dispõe sobre o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza - SNUC, e dá outras providências. Brasília: Poder Executivo, 2002.
- [30] VLB Engenharia. Projeto Básico Consolidado PCH Bela Vista - Relatório Técnico, 2019.
- [31] Ministério da Saúde do Brasil. DataSUS - Departamento de Informática do SUS. 2020. Disponível em: <http://datasus.saude.gov.br/informacoes-de-saude-tabnet>-. Acesso em: 20/07/2021.
- [32] R. Roy, N. A. Braathen. The rising cost of ambient air pollution thus far in the 21st century. 124, 2017. Disponível em: <<https://www.oecd-ilibrary.org/content/paper/d1b2b844-en>>. Acesso em: 20/07/2021.
- [33] IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua - PNAD Contínua. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/2W6m7LR>. Acesso em: 20/07/2021.
- [34] Roland Berger Strategy Consultants. Estudo da competitividade das PCHs no Brasil. São Paulo, 2012.
- [35] D. H. M. Detzel, L. R. Martini Filho, L. M. A. Rangel, M. R. Bessa, K. de Geus. Acerca do período crítico das usinas hidrelétricas brasileiras. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu (PR), 2019.