

revista brasileira de  
**ENERGIA**



Sociedade Brasileira de  
Planejamento Energético

**Criação de Capa e Diagramação**

Kelly Fernanda dos Reis

**Revisão**

Kelly Fernanda dos Reis

**Revista Brasileira de Energia  
Vol. 24 - nº 1**

Itajubá, 2018 - SBPE

Editor: Edson da Costa Bortoni  
108 p.

1 - Energia - artigos

2 - Publicação científica

ISSN: 0104303-X

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

A Revista Brasileira de Energia tem como missão:

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

**Editor Responsável**

Edson da Costa Bortoni

**Comitê Editorial**

Alexandre Salem Szklo

Amaro Pereira

Annemarlen Gehrke Castagna

Clodomiro Unsihuay-Vila

Edmar Luiz Fagundes de Almeida

Edmilson Moutinho dos Santos

Edson da Costa Bortoni

Eduardo Mirko V. Turdera

Elizabeth Cartaxo

Gisele Ferreira Tiryaki

Ivo Leandro Dorileo

Jamil Haddad

Luiz Augusto Horta Nogueira

Oswaldo Soliano

Paulo Henrique de Mello Sant' Ana

Roberto Cesar Betini

Sergio Valdir Bajay

Thulio Cícero Guimarães Pereira

Virginia Parente

Yanko Marcius de A. Xavier

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

**Diretoria da SBPE**

Presidente: Célio Bermann

Vice-Presidente: Ivo Leandro Dorileo

Diretor de Eventos: Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas

Diretora de Publicações: Annemarlen Gehrke Castagna

Diretor Administrativo: Jamil Haddad

**Conselho Fiscal**

Roberto Akira Yamachita

Edson da Costa Bortoni

Luiz Augusto Horta Nogueira

**Conselho Consultivo**

Afonso Henriques Moreira Santos

Célio Bermann

Edmilson Moutinho dos Santos

Ivan Marques de Toledo Camargo

Jamil Haddad

José Roberto Moreira

Luiz Pinguelli Rosa

Maurício Tiommo Tolmasquim

Oswaldo Lívio Soliano Pereira

Sergio Valdir Bajay

**Secretaria Executiva da SBPE**

Lúcia Garrido e Kelly Reis

Endereço

Av. BPS, 1303 – Pinheirinho

Itajubá – MG – CEP:37.500-903

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

Os artigos podem ser enviados através do site da SBPE

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

# SUMÁRIO

**ANÁLISES DE SENSIBILIDADE E ELASTICIDADE DOS BENEFÍCIOS ECONÔMICOS DE UM PROJETO DE UMA CENTRAL HIDRELÉTRICA NO SUL DE MINAS GERAIS.....07**

Adriano Scarpa Henriques Mendes Moreira, Ivan Felipe Silva dos Santos, Geraldo Lúcio Tiago Filho, Regina Mambeli Barros

**INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS COM GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: ANÁLISE DO PANORAMA BRASILEIRO E SOTEROPOLITANO.....27**

Thiago Figueiredo de Oliveira, Cintia Ramos Costa da Cruz, Elizabeth da Rocha Couto

**OIL PRICES, NON-DETERMINISTIC PATH DEPENDENCE AND THE FUTURE OF THE WORLD ENERGY ORDER.....55**

Francisco Ebeling

**ÓLEO DE ALGODÃO COMO MATÉRIA-PRIMAPARA A INDÚSTRIA BRASILEIRA DE BIODIESEL.....88**

Leandro Henrique Ribeiro Varão, Thiago Alves Lopes Silva, Hernán Darío Zamora Zamora, Daniel Pasquini



## **ANÁLISES DE SENSIBILIDADE E ELASTICIDADE DOS BENEFÍCIOS ECONÔMICOS DE UM PROJETO DE UMA CENTRAL HIDRELÉTRICA NO SUL DE MINAS GERAIS**

Adriano Scarpa Henriques Mendes Moreira  
Ivan Felipe Silva dos Santos  
Geraldo Lúcio Tiago Filho  
Regina Mambeli Barros

***Universidade Federal de Itajubá***

Em virtude da necessidade de produção de energia, catalisadora de desenvolvimento econômico, e das limitadas reservas de combustíveis fósseis, torna-se cada vez mais necessário o estudo de sistemas que gerem energia por meio de recursos renováveis. Neste contexto, as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) se tornam uma boa opção para produção de energia, por meio de uma fonte renovável de tecnologia consolidada, baixo impacto ambiental e possibilidade de produção descentralizada, próxima aos centros consumidores. O presente trabalho apresenta uma série de análises energéticas e econômicas (incluindo análises de risco) em um projeto de uma central hidrelétrica. Fatores como a influência do mercado sobre o aproveitamento financeiramente ótimo de um projeto de uma usina e os riscos de implantação da mesma foram analisados. Por fim, a sensibilidade dos benefícios líquidos de um projeto de uma PCH e as variações dos diversos parâmetros de influência, foram avaliadas por meio da construção de diversos cenários aleatórios. A metodologia desenvolvida no presente trabalho para análise de sensibilidade se baseia no cálculo das elasticidades, mais frequentes em cenários de grande variação aleatória, e pode ser aplicada a vários projetos como ferramenta auxiliar à tomada de decisão. Os resultados obtidos demonstraram que as variáveis de maior impacto sobre a viabilidade econômica da usina hidrelétrica são a tarifa de venda de energia elétrica e taxa de desconto. Estas variáveis são aquelas que devem ser otimizadas e incentivadas, caso se deseje fomentar o desenvolvimento de hidrelétricas no país.

Palavras- chave: energias renováveis, pequenas centrais hidrelétricas, risco e análises de sensibilidade e elasticidade.

**ABSTRACT**

In the face of the need for energy production, a catalyst for economic development, and limited fossil fuel reserves, it is increasingly necessary to study systems that generate energy through renewable resources. In this context, as Small Hydroelectric Power Plants (SHP) become a good option for energy production through a renewable source of consolidated technology, low environmental impact and the possibility of decentralized production, close to consumer centers. The present paper presents a series of energy and economic analyzes (including risk analysis) in a SHP project. Factors such as an influence of the market on the economics of the project, the ideal power of a project of a SHP and the risk of implementation of the same, were analyzed. Finally, the sensitivity of the net benefits of a SHP project to the variations of the various influence parameters were evaluated through the construction of several random scenarios. The methodology developed in the present work for sensitivity analysis is based on the calculation of the most frequent elasticities in scenarios of great random variation and can be applied to several projects as an auxiliary asset to decision making. The results showed that the variables with the greatest impact on the economic viability of the hydroelectric plant are the electric energy sales rate and the discount rate. These variables are those that should be optimized and encouraged if one wishes to foster the development of hydroelectric plants in the country.

Keywords: renewable energy, small hydropower, risk, sensitivity and elasticities analysis.

**1. INTRODUÇÃO**

A geração de energia elétrica está estritamente ligada ao desenvolvimento comercial, industrial, social e econômico de um país. No Brasil, a eletricidade gerada é predominantemente de fonte hidráulica (por volta de 68,1% da capacidade instalada – EPE, 2017), totalizando uma potência instalada de 98 GW. Deste total, 4,95 GW correspondem a Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e 0,52 GW as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs) (ANEEL, 2017). A partir de 11/2016, com a implantação da Lei 13.360 de 17 de novembro de 2016, o limite de potência das PCHs passou a ser de 3 a 50 MW. Passaram então a ser classificados como CGHs os aproveitamentos de potências até 5 MW (BRASIL, 2016).

As PCHs são vantajosas por provocarem impactos ambientais negativos e sociais reduzidos, devido a menor área do reservatório e ausência de regularização da vazão, propiciando a diminuição da

desapropriação de áreas e dos impactos sobre a ictiofauna. Além disto, de acordo com Agência Internacional de Energia – IEA (IEA 1998, apud Akella et al., 2009) as emissões de gases de efeito estufa ao longo de todo ciclo de vida das PCHs são pequenas, variando de 7 a 9 gCO<sub>2</sub>/kWh, valor mais que 100 vezes inferior às emissões de usinas térmicas à carvão tradicionais, sendo de fácil engenharia, tecnologia consolidada e rápida construção (Zhou et al., 2009). Outra grande vantagem das PCHs é a possibilidade de utilização destas de modo descentralizado, onde a geração ocorre próxima aos grandes centros consumidores, o que implica em menores perdas de energia e riscos menos acentuados (Vergílio, 2012).

De acordo com Pizzol (2011), por ter o domínio tecnológico, para o Brasil, a disseminação de PCHs incide diretamente na geração de empregos em todo o seu ciclo produtivo, garantindo benefícios sociais ao país, desde a concepção e desenvolvimento do projeto, como na fabricação de seus componentes, construção de sua estrutura, na operação e controle da sua operação, assim como na comercialização da energia gerada.

Apesar de a geração hidrelétrica ser a fonte renovável mais utilizada em todo mundo, sendo responsável por cerca de 20% de toda eletricidade gerada (Ostojic et al., 2013), o potencial hidrelétrico remanescente não explorado mundialmente, somente das PCHs acima de 10 MW, é bastante elevado e está próximo a 97 GW (UNIDO e ICSHP, 2013). O aproveitamento hidrelétrico de PCHs está presente em todos os continentes. O país com maior potencial a ser explorado é a China (Zhou et al., 2009), mas vários outros países também possuem destaque na exploração de PCHs, como o Brasil, Turquia e Índia.

O desenvolvimento das PCHs é limitado pela viabilidade econômica de sua implantação e operação, face às características do mercado de comercialização de energia elétrica e pela regulação normativa e ambiental. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo avaliar, em termos energéticos e econômicos, um projeto de uma PCH localizada em um potencial hidrelétrico no sul de Minas Gerais.

A fim de auxiliar os estudos de viabilidade financeira destes projetos, o presente artigo analisa ainda a magnitude da influência dos diversos parâmetros ligados a uma PCH sobre o benefício líquido que esta proporciona ao investidor, utilizando uma metodologia que compreende análise de sensibilidade e elasticidade em cenários aleatórios. Tal análise possibilita a identificação dos fatores que mais ampliam os benefícios econômicos, para que estes sejam otimizados com objetivo de se maximizar a rentabilidade do empreendimento.

## 2. METODOLOGIA

A seguir estão apresentados os passos da metodologia aplicada neste artigo.

### 2.1 Caracterização da PCH analisada

O projeto hidrelétrico utilizado no presente trabalho é localizado no município de Delfim Moreira-MG (ponto de coordenadas:  $22^{\circ}22'33.74''\text{S}$  e  $45^{\circ}14'36.32''\text{O}$ ), no Rio Lourenço Velho e ainda não foi instalado. O local foi escolhido devido à existência de um trecho curvo do rio, sendo a topografia do local bastante favorável, visto que se trata de um vale encaixado, o que favorece a construção do empreendimento. A Figura 1 apresenta o local de estudo. A área de drenagem resultante da PCH traçada no local foi de  $282 \text{ km}^2$  e a queda do projeto definida inicialmente foi de 25 m.

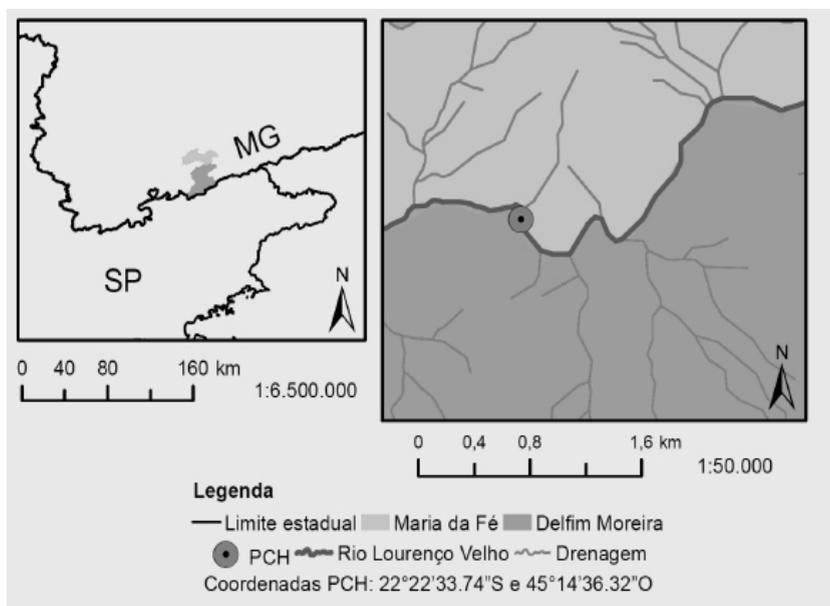


Figura 1 - Localização do projeto da PCH

### 2.2 Avaliação do potencial hidrológico do local do projeto

Para avaliação do potencial hidrológico local seguiu-se os seguintes passos:

(i) seleção das estações fluviométricas: os postos próximos ao local de construção da PCH foram identificados por meio do portal HIDROWEB da Agência Nacional das Águas (ANA, 2014). Foram estes: São João de Itajubá, Bairro da Santa Cruz, Itajubá e Delfim Moreira.

(ii) determinação de um posto base e preenchimento de falhas: o posto cujos dados serviriam de base para determinação da PCH pode ser determinado pela análise dos critérios: i) mesma sub-bacia e mesmo rio, ii) amplitude da série, iii) menor número de falhas e iv) área de drenagem do poço, inferior ao triplo da área da drenagem da PCH. O preenchimento de falhas de dados hidrológicos foi realizado por meio da construção de uma correlação entre o posto base e os demais postos próximos.

(iii) transposição de vazões: transposição do hidrograma do posto escolhido para o local da PCH, por meio de uma relação de áreas, conforme apresenta a Equação (1).

$$Q_{i_{PCH}} = A_{PF} \cdot \left( \frac{Q_{i_{PF}}}{A_{PCH}} \right) \quad (1)$$

Onde:

$Q_{i_{PCH}}$  = vazão na PCH em m<sup>3</sup>/s;

$A_{PF}$  = área de drenagem do posto fluviométrico em km<sup>2</sup>;

$Q_{i_{PF}}$  = vazão no posto fluviométrico em m<sup>3</sup>/s, e

$A_{PCH}$  = área de drenagem do posto fluviométrico em km<sup>2</sup>.

(iv) determinação da vazão ecológica: trata-se da vazão que deve ser mantida no rio por meio do trecho de vazão reduzida. Em Minas Gerais, esta vazão equivale a 50% da vazão mínima de 7 dias, com 10 anos de período de retorno ( $Q_{7,10}$ ) (IGAM, 2014). Na bacia do projeto da PCH, esta pode ser determinada por meio da correlação apresentada na Equação (2), desenvolvida por Maia (2003), que relaciona com satisfatório coeficiente de correlação  $R^2$  (0,92), exatamente na bacia do projeto, a vazão mínima  $Q_{7,10}$  com a área de drenagem.

$$Q_{7,10} = 0,0055 \cdot A_{dr} \quad (2)$$

Onde:

$Q_{7,10}$  = vazão mínima de 7 dias, com 10 anos de tempo de retorno em m<sup>3</sup>/s, e

$A_{dr}$  = área de drenagem do ponto em questão em km<sup>2</sup>.

(v) determinação da curva de permanência: trata-se da curva que relaciona certa vazão com o percentual de tempo em que esta é verificada em determinado curso d'água, e pode ser obtida por meio do cálculo da frequência das vazões, com base no hidrograma histórico transposto para a PCH, obtido por meio dos passos anteriores.

### 2.3 Determinação da potência ótima de implantação

A potência relativa à maior vazão disponível na hidrologia local, geralmente não coincide com aquela que resultará na potência instalada ótima (maior benefícios) de um empreendimento de uma PCH, dado que esta só será frequente no curso d'água em um pequeno período do ano. Desta forma, são necessários métodos de otimização na determinação da potência a ser instalada e estes têm sido estudados por diversos autores (Anagnostopoulos e Papantonis, 2007; Souza et al. 2009; Santolin et al., 2011). O método aplicado no presente trabalho é o método do Máximo Benefício Líquido (MBL).

O método do MBL (Souza et al., 2009; Santos et al., 2016) otimiza a potência instalada levando em conta fatores econômicos de mercado, tais como, investimento inicial, taxa de juros e tarifa de venda de energia. De acordo com Simeons (1980, apud Cardoso et al., 2011), o Benefício Líquido Anual ( $B_{LA}$ ) de uma PCH pode ser calculado pela Equação (3).

$$B_{LA} = E \cdot T - I \cdot FRC - C_{om} \quad (3)$$

Onde:

$E$  = energia gerada anualmente em kWh;

$T$  = tarifa e venda de energia em R\$/kWh;

$I$  = investimento inicial para implantação do empreendimento em R\$;

$FRC$  = fator de recuperação de capital, e

$C_{om}$  = custo de operação e manutenção anual em R\$/ano.

No método MBL os benefícios líquidos anuais são calculados para cada potência disponível, resultante da curva de permanência de vazões, e com elas relacionados ( $B_{LA} = f(P)$ ). Do cálculo diferencial, o ponto de máxima rentabilidade econômica será aquele em que a derivada da função  $B_{LA}$ , com relação à potência, se igualar a zero, conforme Equação (4). De modo gráfico, a Potência ótima pode ser obtida pela observação do pico da curva da função  $B_{LA} \times P$  que normalmente apresenta formato parabólico (Figura 2).

$$\frac{dB_{LA}}{dP} (P_{otm}) = 0 \quad (4)$$

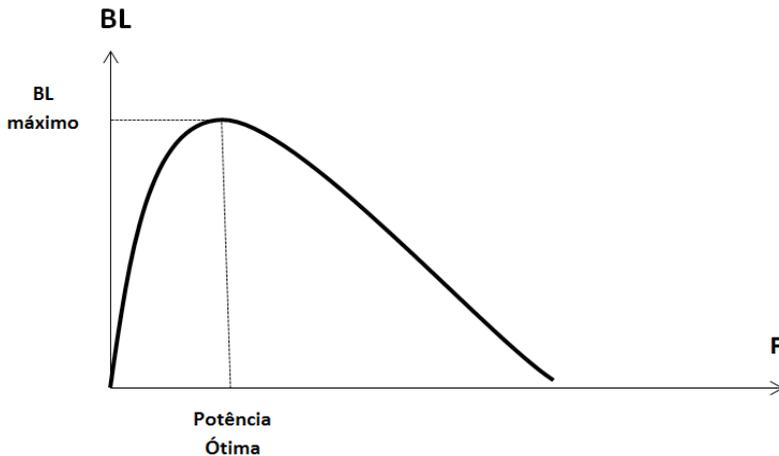


Figura 2 - Formato típico da curva  $B_{LA} \times P$

Com a potência definida, o fator de capacidade ( $f_c$ ) da planta pode ser calculado. Este é dado pela relação da energia média gerada ( $E_{méd}$ ) e a capacidade de geração da planta, caso operasse com a potência média por todo ano, conforme apresenta a Equação (5).

$$f_c = \frac{E_{méd}}{E_{ger}} = \frac{E_{méd}}{P_{ótima} \cdot 8760} \quad (5)$$

Onde:

$E_{ger}$  = energia gerada caso a potência ótima instalada operasse ao longo de todo ano, e

8760 = número de horas anuais.

## 2.4 Fatores de influência no benefício líquido

Pela análise da Equação (3) observa-se os diversos parâmetros que influenciam nas análises dos benefícios econômicos de uma PCH, dado que a energia produzida anualmente pode ser reescrita em função do fator de capacidade e da potência multiplicada pelo número de horas do ano (8760), por meio da Equação (5). O custo de operação e manutenção de uma PCH é geralmente tomado como sendo 5% do investimento inicial (Eletrobrás, 2002). O investimento inicial equivale ao produto entre potência e Custo unitário ( $C_{un}$ ). Pode-se então reescrever a Equação (6), conforme mostrado na sequência.

$$B_{LA} = P \cdot f_c \cdot 8760 - C_{un} \cdot P \cdot FRC - 0,05 \cdot C_{un} \cdot P \quad (6)$$

As estimativas para o custo unitário de PCHs têm sido desenvolvidas por diversos autores em diversas partes do mundo (Gordon, 1982; Aggidis et al., 2010; Tiago Filho et al. 2017). No presente artigo optou-se por utilizar a estimativa apresentada em Tiago Filho et al. (2017), dado que esta apresenta correlação satisfatória com os custos do cenário brasileiro. Esta estimativa se baseia no parâmetro Fator de Aspecto - FA, Equação (7); parâmetro com significado físico que se relaciona com a potência e queda da planta. A estimativa de  $C_{un}$  é realizada pela Equação (8) (em R\$/kW). O fator de recuperação de capital é calculado pela Equação (9).

$$FA = 1821,43 \cdot \frac{\sqrt{\frac{P}{1000}}}{H^{1,25}} \quad (7)$$

$$C_{un} = 4962 \cdot (FA^{0,085}) \quad (8)$$

$$FRC = \frac{i \cdot (i + 1)^n}{(i + 1)^n - 1} \quad (9)$$

Onde:

$H$  = queda em m;

$n$  = vida útil em anos, e

$i$  = taxa de juros anual do empreendimento.

Substituindo-se por fim, as Equações (7) a (9) na Equação (6), obtêm-se a Equação (10). Nesta podem ser observados, de modo resumido, os fatores de principal influência sobre a rentabilidade do empreendimento hidrelétrico, como apresentado na Equação (11). Estes são os parâmetros que terão sua influência sobre o  $B_{LA}$  analisados no presente trabalho. Optou-se por não incluir a vazão ( $Q$ ) nas análises, devido à equivalência entre esta e a potência, ao se fixar um valor de queda.

$$B_{LA} = P \cdot \left\{ 8760 \cdot fc \cdot T - 4962 \cdot \left( \frac{\sqrt{(P \cdot 10^{-3})}}{H^{1,25}} \cdot 1821,43 \right)^{0,085} \cdot \left[ \left( 0,05 + \frac{i \cdot (i + 1)^n}{(i + 1)^n - 1} \right) \right] \right\} \quad (10)$$

$$BL = f(P, fc, T, H, i, n) \quad (11)$$

## 2.5 Análise de risco

No presente trabalho define-se como risco ( $r$ ) a probabilidade ( $p$ ) do benefício ser inferior à zero (ou seja, de não ocorrer à viabilidade da usina), conforme Santos et al. (2017). O risco foi calculado por meio do número de repetições de benefícios negativos dentro de mil cenários econômicos aleatórios (Combinações de  $i$ ,  $T$  e  $n$  passíveis de ocorrerem) conforme apresenta a Equação (12). Desta forma, o risco de inviabilidade  $r$  quantifica o número de cenários econômicos que permitiriam a viabilização da usina, caso esta fosse instalada com certa potência, auxiliando assim a tomada de decisão dos empreendedores (Santos et al., 2017).

$$r = \frac{n}{m} \quad (12)$$

Onde:

$n$  = número de benefícios negativos e  
 $m$  = número de cenários totais = 1000.

## 2.6 Análise de elasticidade

A magnitude da influência dos fatores relacionados ao  $B_{LA}$  foi analisada por meio de uma análise estatística utilizando o parâmetro elasticidade ( $\varepsilon$ ). A aplicação do conceito de elasticidade a cálculos energéticos já tem sido realizada por outros autores como Santos et al. (2015). Vasconcellos (2008) definiu a elasticidade ( $\varepsilon$ ,) como sendo resposta de uma variável em face de mudanças em outras variáveis. De modo genérico, esta pode ser calculada como sendo a relação entre a variação percentual de uma variável  $y$  e a variação percentual de outra variável  $x$  (Equação (13)). Caso  $\varepsilon < 1$ ,  $y$  é inelástica às variações de  $x$ . Caso  $\varepsilon = 1$ , a elasticidade entre ambas é unitária e caso  $\varepsilon > 1$ , a variável  $y$  é elástica com relação a  $x$ .

$$\varepsilon = \frac{\Delta y/y}{\Delta x/x} \quad (13)$$

No presente trabalho a elasticidade do benefício líquido foi calculada com relação a cada um dos parâmetros da Equação (13), por meio de 200.000 combinações aleatórias entre os demais parâmetros. Por exemplo, para se saber a elasticidade dos benefícios financeiros à tarifa de venda de energia, foram definidos três valores de tarifa dentro dos limites estabelecidos na Tabela 1. Para cada uma destas tarifas, todos os outros parâmetros foram variados em 200.000 cenários (Tabela 1) produzindo as mais diversas variações de situações possíveis. As elasticidades foram então calculadas (em módulo) entre a tarifa intermediária e a menor tarifa (cenário C1) e entre a maior tarifa e a intermediária (cenário C2), obtendo-se um total de 400.000 elasticidades. O mesmo procedimento foi repetido para os demais parâmetros. Desta forma, foi possível obter histogramas que indicavam os valores de elasticidades mais frequentes da variação do  $B_{LA}$  com relação a cada um dos parâmetros analisados. O histograma resultante foi utilizado para a determinação da magnitude da influência de cada um dos fatores estudados.

Tabela 1 - Faixas de variações possíveis para cada um dos parâmetros

Vida útil - n em anos	30 a 50
Tarifa - T em R\$/kWh	0,09 a 0,15
Taxa de juros - i	0,09 a 0,15
Queda - H em m	15 a 35
Vazão - Q em m <sup>3</sup> /s	0,82 a 17,17

### 3. RESULTADOS

Após o procedimento de determinação do potencial hidrológico local (procedimento descrito na seção 2.1 da metodologia) pôde-se calcular a curva de permanência, tal como mostrado na Figura 3. Esta foi utilizada a fim de se realizar todos os cálculos hidroenergéticos da PCH. O fator de capacidade de cada potência, possível de ser implantada no potencial hidrelétrico analisado, foi calculado e relacionado com a própria potência por meio do software Excel®. Esta relação é apresentada na Equação (16), sendo o coeficiente de correlação  $R^2$ , resultante da relação construída, igual a 0,99, valor altamente satisfatório.

Por meio da relação obtida na Equação (14), pôde-se calcular o fator de capacidade por meio da potência em cada cenário aleatório

construído no presente trabalho. Pela Equação (14), observa-se ainda que, conforme se aumenta a potência, menor é o fator de capacidade devido à menor permanência da vazão relativa a esta potência.

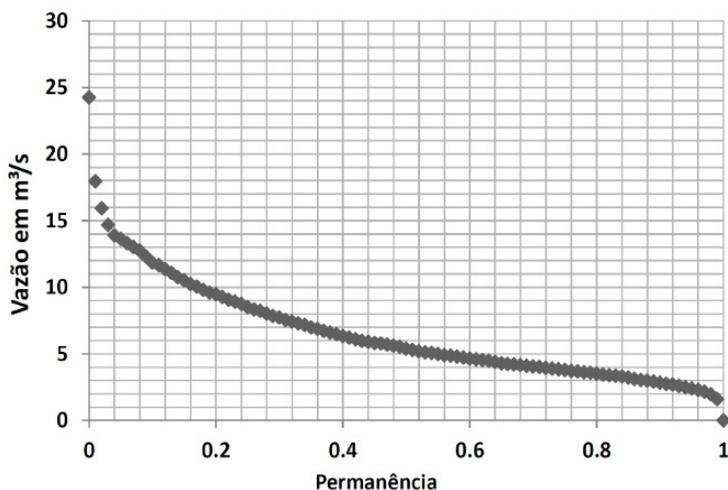


Figura 3 - Curva de permanência

$$f_c = 1,142 \cdot P^{-0,003151} \quad (14)$$

Também se analisou a distribuição de riscos do empreendimento. O resultado está apresentado na Figura 4. Nesta, pode-se observar os seguintes comportamentos:

- conforme se aumenta a potência instalada, cresce o risco de inviabilidade do empreendimento. Isso ocorre devido à menor permanência das maiores potências. Por outro lado, as potências de menor risco são aquelas de maior permanência, contudo nem sempre são estas as de maior rentabilidade;
- para uma tarifa de 0,125 R\$/kWh, uma taxa de juros de 9% e uma vida útil igual = 50 anos, o método do máximo benefício líquido indica uma potência ótima de 752 kW, potência de risco associado próximo a 20%. Os resultados desta análise mostram que estas combinações de dados econômicos implicam em um cenário de mercado desfavorável, onde a potência ótima é reduzida e se aproxima dos valores menos arriscados.

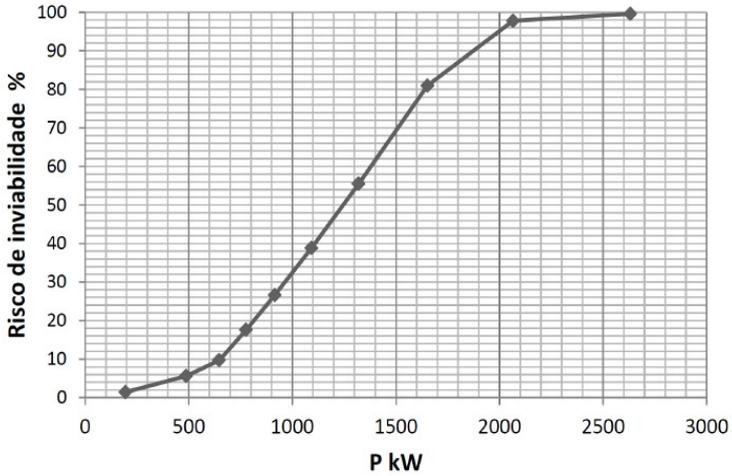


Figura 4 - Análise de risco de inviabilidade em função da potência

O procedimento adotado para avaliação das elasticidades permitiu a obtenção da Figura 5, que apresenta a distribuição das frequências destas elasticidades em um histograma percentual para todos os parâmetros analisados, em ambos cenários de elasticidade (do valor intermediário para o menor valor – C1 e do maior valor para o valor intermediário – C2).

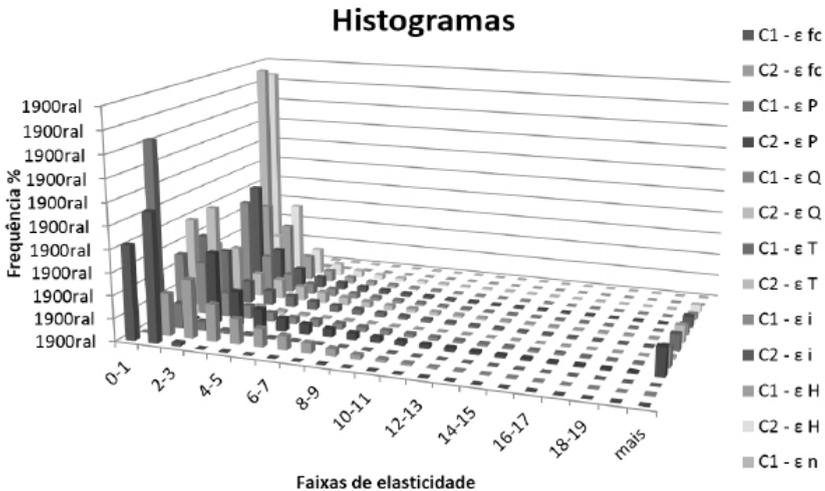


Figura 5 - Histogramas das elasticidades do  $B_{LA}$  à variação de todos os parâmetros, em ambos os cenários analisados

A fim de melhorar a visualização dos resultados da Figura 5 e obter um indicador, de qual faixa de variação cada elasticidade se concentra, calculou-se, em ambos cenários de variação de cada parâmetro, a média ponderada  $k$ , por meio da Equação (15). As médias ponderadas resultantes estão apresentadas na Figura 6.

$$k = \sum_{i=1}^n f_i \cdot t_i \quad (15)$$

Onde:

$k$  = média ponderada;

$f$  = frequência da elasticidade em uma dada faixa de variação, e

$t$  = ponto médio desta faixa de variação.

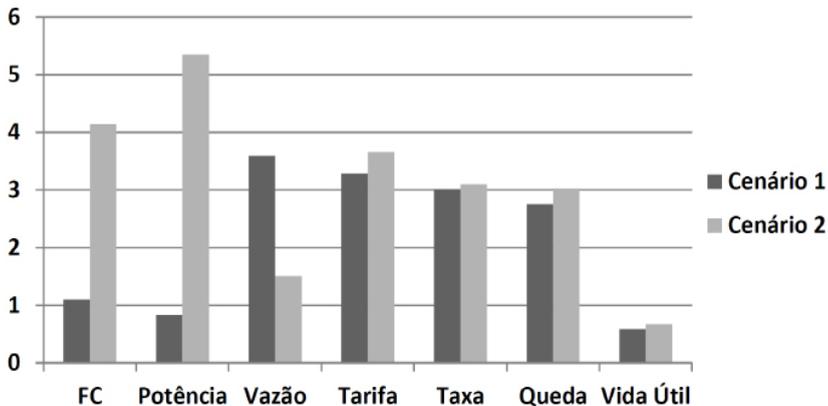


Figura 6 - Comparação da média ponderada das elasticidades

De posse dos resultados das Figuras 5 e 6 acima, observa-se que, apesar das faixas de variações de cada variável diferirem entre os dois cenários, a média ponderada entre estas foi bastante parecida nos casos da tarifa, da taxa, vida útil e queda. Desta forma a média ponderada se torna um indicativo para se estudar a elasticidade média do benefício líquido em relação à variação dos parâmetros influentes.

Os parâmetros que mais se diferenciaram entre ambos cenários analisados foram relacionados à potência, fator de capacidade e à vazão. Isto se deve ao fato de que os dois primeiros são função da vazão. Desta forma, esses parâmetros tendem a seguir um formato curvilíneo, quando relacionados com o  $B_{LA}$ , apresentando a existência de um ponto de pico; fato que colabora para uma maior heterogeneidade da elasticidade ao longo da curva. Este comportamento está exemplificado na Figura 7, para uma curva  $B_{LA} \times Q$  (ressaltando-se que como são 200.000 combinações dos parâmetros não variáveis, logo na realidade serão 200.000 curvas, o que contribui para uma maior discrepância dos resultados obtidos nestes cenários). Assim, para se analisar a elasticidade destas variáveis, devem ser adotados mais do que três cenários de variações das mesmas, ou devem ser realizadas restrições em regiões específicas.

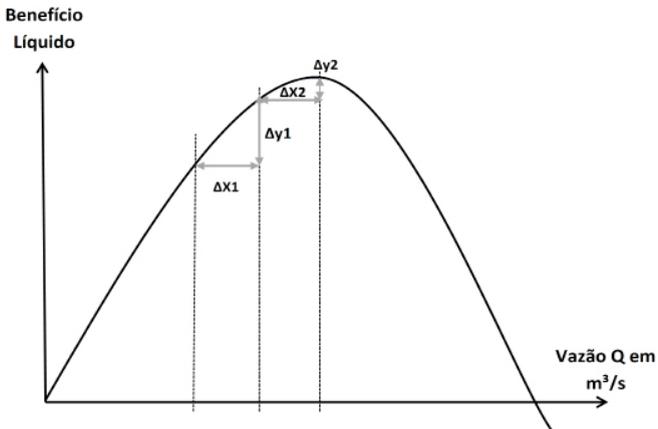


Figura 7 - Variação acentuada da elasticidade entre os diversos trechos das curvas de BL X Vazão

#### 4. CONCLUSÕES

A fim de auxiliar o desenvolvimento de CGHs e PCHs no Brasil, o presente trabalho apresentou análises de elasticidades dentro de um projeto de uma central hidrelétrica com o intuito de se obter os parâmetros de principal influência sobre a sua rentabilidade. A partir do cálculo das elasticidades realizado no presente trabalho, pode se concluir que a elasticidade dos parâmetros relacionados à vazão é bastante variável entre os diversos trechos de valores de vazão, devido ao formato

parabólico e curvilíneo das curvas de relação entre o  $B_{LA}$  e estas variáveis.

Em ambos os cenários de variação analisados, os demais parâmetros seguiram a seguinte ordem: 1) tarifa de venda de energia, 2) taxa de juros, 3) queda e 4) vida útil. Desta forma, caso se deseje ampliar os benefícios de uma PCH, deve-se aumentar preferencialmente o parâmetro tarifa de venda de energia ou diminuir-se a taxa de juros. O parâmetro de menor influência no  $B_{LA}$  foi, em todos os casos, a vida útil  $n$ . Assim sendo, aumentos na vida útil ou no tempo de concessão da usina são os menos eficazes na ampliação da rentabilidade econômica da usina. A metodologia desenvolvida no presente trabalho pode ser aplicada a vários outros tipos de empreendimento a fim de se analisar custos e benefícios, quais os parâmetros de maior e menor influência, etc. Tais dados podem se tornar ferramentas auxiliares às políticas públicas de desenvolvimento no campo energético e também à tomada de decisões por parte de investidores. A aplicação desta metodologia em outros projetos de energias renováveis permanece como sugestão para trabalhos futuros.

O estudo das influências das variáveis envolvidas sobre a viabilidade econômica de projetos de energia, pelos órgãos governamentais responsáveis, se tornaria interessante para o empreendedor e, conseqüentemente, para a sociedade, dado que assim as tarifas de venda de energia dos leilões e taxas de juros praticadas no, poderiam ser definidas de modo diferenciado para cada fonte em função da maior ou menor influência de cada parâmetro. Com isto, o planejamento energético nacional e a construção de políticas públicas de concessão de benefícios poderiam ser realizados de modo mais eficiente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pela concessão de bolsa de doutorado ao aluno Ivan Felipe Silva dos Santos e ao CNPq pela concessão de bolsa de produtividade em pesquisa à Prof. Dra. Regina Mambeli Barros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGIDIS, G. A. LUCHINSKAYA, E. ROTHSCHILD, R. HOWARD, D. C. The costs of small-scale hydro power production: Impact on the development of existing potential. *Renewable Energy*. Vol.35, p. 2632-2638, 2010.

ANAGNOSTOPOULOS, J. S. e PAPANTONIS, D. E. Optimal sizing of a run-of-river small hydropower plant. *Energy Conversion and Management*, V. 48, p. 2663–2670, 2007.

AKELLA, A. K. SAINI, R. P. SHARMA, M. P. Social, economic and environmental impacts of renewable energy systems. *Renewable Energy*. V. 34, pp.390-396, 2009.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Informações Gerenciais (BIG), Março, 2017. Disponível em < <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+1%C2%BA+trimestre+de+2017/798691d2-990b-3b36-1833-c3e8c9861c21>>. Acesso: 08/05/2018.>.

BRASIL. Lei Nº 13.360, 17 de Novembro de 2016. Lei do Governo Federal Brasileiro. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2016/lei/L13360.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/L13360.htm)>. Acesso: 08/05/2018.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional (BEN), 2017. Relatório Síntese-ano base: 2016. Disponível em < [https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final\\_2017\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf)>. Acesso: 08/05/2018.

CARDOSO, R. B.; ALMEIDA, R. P. e NOGUEIRA, L. A. H. Uma avaliação do método expedito para determinação da vazão de projeto em pequenas centrais hidrelétricas. Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH), 2011.

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. “Diretrizes para Estudos e Projetos de PCH”, Ed. Eletrobrás, RJ, 2000.

GORDON, J. L. Estimating Equations hydro stations costs. *J. of Water Power Dam Living*. 33, Pp.31 -33, 1982.

HIDROWEB. Agência Nacional das Águas (ANA), 2014. Disponível em < <http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso: 12/2014.

IEA. International Energy Agency. Benign energy? The environmental implications of renewables. Paris: OECD; 1998. p. 15, 45

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas, Brasil. Disponível em <<http://www.igam.mg.gov.br/component/content/article/1183-resolucao-definopercentual-de-concessao-das-outorgas-de-uso-da-agua-em-minas-gerais>>. Acesso: 12/2014.

KALDELLIS, J.K. VLACHOU, S. KORBAKIS, G. Techno-economic evaluation of small hydro power plants in Greece: a complete sensitivity analysis. *Energy Policy*, V.33, p.1969–85, 2005.

OSTOJIC, G. STANKOVSKI, S. RATKOVIC, Z. MILADINOVIC, L. MAKSIMOVIC, R. 100% Development of hydro potential in Republic Srpska. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 28, 2013, p. 196-203.

PIZZOL, C. C. S. Projeção do Crescimento do Mercado Brasileiro Para as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). Dissertação de mestrado (Engenharia de Energia). Universidade Federal de Itajubá (MG), 2011.

SANTOLIN, A. CAVAZZINI, G. PAVESI, G. ARDIZZON, G. ROSETTI, A. Techno-economical method for the capacity sizing of a small hydropower plant. *Energy Conversion and Management*, V.52, p. 2533–2541, 2011.

SANTOS, I. F. S.; TIAGO FILHO, G. L. ; BARROS, R M. Análises econômicas de sensibilidade e elasticidade em projetos de energias renováveis no Brasil. *Revista Brasileira de Energia*, v. 21, p. 7, 2015.

SANTOS, I. F. S.; TIAGO FILHO, G. L. BARROS, R M. SILVA, F. G. B. Sensibility Analysis of Economically Optimum Scenarios of a Small Hydropower (SHP) implementation Project in Brazil. *PCH Notícias & SHP News*, v. 68, p. 19-24, 2016.

SANTOS, I. F. S.; TIAGO FILHO, G. L. ; BARROS, R. M. ; FERNANDES, G. L. . Optimization and financial risk analysis of Small Hydro Power (SHPs) dimensioning, considering the CDM benefits. *American Journal of HydroPower, Water and Environment Systems*, 2017.

SIMEONS, C.M.A. *Hidro-Power – The use water as an alternative source of energy*, First edition, Oxford, 1980.

SOUZA, Z. SANTOS, H. M. COSTA, E. B. *Centrais Hidrelétricas: Implantação e Comissionamento*. Rio de Janeiro (RJ), Ed. Interciência, 2ª ed., 2009.

TIAGO FILHO, G., L. Viabilidade econômico financeira do desenvolvimento de projetos de PCHs - VII Conferência de Centrais Hidrelétricas, Centro de Convenções do Novotel Center Norte, São Paulo – SP, 03 e 04 de Agosto de 2011.

TIAGO FILHO, G.L. ROCHA, C. G. BARBOSA, A. C. BARROS, R. M. SILVA, F. B. G. Analysis of Brazilian SHP policy and its regulation scenario. *Energy Policy*. V. 39, p. 6689-6697, 2011.

TIAGO FILHO, G. L. SANTOS, I.F.S. BARROS, R. M. Cost estimate of small hydroelectric power plants based on the aspect factor. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 77, p. 229-238, 2017.

VASCONCELLOS, M. A. S. *Economia: Micro e Macro*. 4º Ed. Editora Atlas S.A, São Paulo, pp. 441, 2008.

VERGÍLIO, K. E. P. *Geração distribuída e Pequenas Centrais Hidrelétricas: Alternativas para geração elétrica no Brasil*. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade Estadual de São Paulo (USP – Monografia), 2012.

ZHOU, S. ZHANG, X. LIU, J.. The trend of small hydropower development in China. *Renewable energy*, V. 34, P. 1078-1083, 2009.

