

# **Análise de Viabilidade Econômica para Recapitação de uma Central de Geração Hidrelétrica**

**Cauan Eric Barbosa Vaz  
João Alves da Silva Neto  
Bruno de Nadai Nascimento  
Rafael Cesar Jabor Fagundes**

## **Resumo**

A matriz energética do Brasil é composta, em sua grande parte, por energia hidráulica oriunda de grandes empreendimentos. No entanto, devido aos problemas ambientais, minimização das perdas no sistema de transmissão e até mesmo a extinção de novos locais a serem explorados, abre-se espaço para outros tipos de geração. Uma das opções é a Geração Distribuída (GD) que pode ser representada pela inclusão de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) no sistema de distribuição. Assim, este trabalho apresenta a repotencialização de uma instalação hidrelétrica. São obtidas a curva de duração das vazões, potência, energia gerada e vazão média. Na sequência, avaliam-se os custos do investimento, bem como o critério de motorização adotado e o cálculo dos grupos geradores. Por fim, faz-se o estudo de viabilidade da Central Hidrelétrica. O local em potencial localiza-se no município de Turvolândia, sul do estado de Minas Gerais aproveitando o fluxo do Rio Dourado, com latitude  $21^{\circ}53'19.54''\text{S}$  e longitude  $45^{\circ}51'41.63''\text{O}$ .

Palavra-Chave: Geração Distribuída, Pequenas Centrais Hidrelétricas, Estudo de Viabilidade.

## **Economic Viability Analysis for Recapitulation of a Hydroelectric Generation Plant**

### **Abstract**

The energy matrix in Brazil is largely composed of hydroelectric power from large enterprises. However, due to environmental problems, minimization of losses in the transmission system and even the extinction of new places to be explored, is necessary other types of generation. One of the options is the Distributed Generation (GD) that can be represented by the inclusion of small hydroelectric plants (PCHs) in the distribution system. Thus, this work presents the repowering of a hydroelectric plant. The duration curve, power energy generated and flow rate are obtained. Following, the investment costs, as well as the criterion of motorization adopted and the calculation of the generator sets are evaluated. Finally, the viability study of the hydroelectric plant is carried out. The potential location is in

the municipality of Tuvolândia, south of the state of Minas Gerais with latitude 21°53'19.54"S and longitude 45°51'41.63"W.

Keywords: Distributed Generation, Small Hydropower Plants, Viability Study.

## **1 INTRODUÇÃO**

Atualmente, a matriz elétrica brasileira é composta basicamente por usinas hidrelétricas. Com a participação de 65,2% da geração total (EPE, 2019), representada em sua grande maioria por Grandes Centrais Hidrelétricas, esses empreendimentos induzem uma geração centralizada, distante dos consumidores.

No entanto, diante da necessidade em diminuir as perdas na transmissão por transportar grandes blocos de energia, preocupações ambientais, entre outros; a inserção de Geração Distribuída (GD) nos sistemas de distribuição é uma realidade. Caracterizada pela instalação de unidades geradoras de pequeno porte, a partir de fontes renováveis, a GD possibilita a sua localização próxima aos centros de consumo de energia elétrica.

De forma geral, a presença de pequenos geradores próximos às cargas pode proporcionar diversos benefícios para o sistema elétrico, podendo destacar a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão de energia; o baixo impacto ambiental; a melhoria do nível de tensão da rede no período de carga elevada e a diversificação da matriz energética (Aneel, 2014).

Dentre as principais formas de geração distribuída destacam-se a geração fotovoltaica, eólica e a provinda das Centrais de Geração Hidrelétricas (CGH's). As (CGH's) são geradoras de energia que utilizam o potencial hidrelétrico para sua produção. De acordo com a classificação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), esses empreendimentos podem ter o potencial de gerar de 0 até 3MW de energia (Aneel, 2014).

A repotencialização de CGH pode impulsionar a geração nos sistemas de distribuição. Baseado em levantamentos do antigo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE, o documento afirma que até 1997 havia no Brasil, dentre outras, pelo menos 428 centrais abandonadas (Oliveira, 2018).

Dessa maneira, em vista dos benefícios do uso da geração distribuída para o sistema elétrico e considerando potenciais inativos, esse artigo tem como finalidade realizar a análise da viabilidade econômica para repotencializar uma CGH localizada na cidade de Turvolândia, Sul do estado de Minas Gerais, utilizando métodos de análise econômica como o Valor Presente Líquido (VPL).

Além dessa seção introdutória, o trabalho é dividido da seguinte forma: em 2, apresenta material e métodos. No item 3 são apresentados os resultados e as discussões. Por fim, em 4, as conclusões.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Série Histórica de Vazões**

A determinação do histórico de vazões é um grande desafio enfrentado pelos projetistas. Muitos potenciais não possuem postos fluviométricos e, se possuem, muitas dessas medidas podem estar ausentes. Dessa maneira, utiliza-se o método denominado transposição de vazões e complementação de séries, dados na referência (Z. Souza, 2009), que consiste na utilização de informações de postos de medição de um rio para representar vazões de outros rios em análise.

### **2.2 Vazões Mínima e Sanitária**

As vazões mínimas são usadas para a determinação da vazão ecológica (sanitária), isto é, a vazão mínima para os cursos d'água no trecho entre a tomada d'água e o canal de fuga. Isso é feito de forma a garantir a sobrevivência da fauna aquática no trecho de vazão reduzida. Para o caso da vazão sanitária, usou-se o critério da vazão mínima de 7 dias consecutivos para um período de recorrência de 10 anos ( $Q_{7/10}$ ) (Z. Souza, 2009).

### **2.3 Curva de Duração das Vazões**

Com a série de vazões históricas, obtém-se a curva de duração de vazões para a CGH. Tem-se a vazão total e a vazão disponível para a geração hidrelétrica. A vazão disponível é obtida subtraindo-se da vazão total do curso d'água a vazão ecológica. Essa curva mostra para cada valor de vazão qual a probabilidade deste ser igualado ou superado (Z. Souza, 2009).

### **2.4 Potência Gerada**

A potência gerada por uma usina hidrelétrica é dada por:

$$P = k \cdot Q \quad (1)$$

Onde  $Q$  é a vazão disponível e  $k$  significa a produtividade da central e pode ser dada pela equação (2).

$$k = \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta \quad (2)$$

Sendo, a massa específica da água ( $\rho$ ) igual a 1000 kg/m<sup>3</sup>, gravidade do local ( $g$ ) igual a 9,8 m/s<sup>2</sup>, queda bruta do local ( $H$ ) igual a 21 metros, rendimento do grupo gerador e sistema de adução ( $\eta$ ) igual a 0,85. Portanto, para obter a curva de duração de potência, multiplica-se a constante  $k$  estabelecida pelo eixo das vazões da curva de duração.

## 2.5 Energia Média Gerada

A partir da curva de duração de potência é possível calcular a energia média gerada. Para isto, basta tomar a área sob a curva de duração de potência em um incremento de 0,5 a 0,5, tendo assim o valor médio que é a própria energia média gerada.

## 2.6 Custos e Benefícios

O custo total de implantação da CGH, incluindo-se obras, engenharia e equipamentos podem ser estimados de várias maneiras. No presente trabalho, o cálculo de estimativa de custo foi baseado na implementação de uma equação de custos através de dados de usinas hidrelétricas construídas no Brasil (F.G.L., 2011). Os dados utilizados são: potência (MW), vazão (m<sup>3</sup>/s), queda bruta (m) e custo total (R\$).

### 2.6.1 Custo Unitário

Os dados foram analisados graficamente traçando uma linha de tendência de Custo Unitário (CU) em função do Fator de Aspecto (FA), que é diretamente proporcional à potência e inversamente proporcional à queda bruta de acordo com a equação (3).

$$FA = 1821,4 \cdot \frac{P^{0,5}}{H^{1,25}} \quad (3)$$

O Custo unitário/Fator de Aspecto ([R\$/kW]/FA) representado por:

$$\frac{R\$/kW}{FA} = 3885,7 \cdot FA^{-0,947} \quad (4)$$

Portanto, para obter o valor do custo unitário, multiplica-se o resultado obtido anteriormente pelo respectivo Fator de Aspecto (F.G.L., 2011).

### 2.6.2 Custo Total

Tendo-se o custo unitário e a potência, obtém-se o custo total:

$$CT = CU \cdot P \quad (5)$$

Onde:

*CT* – Custo Total

*CU* – Custo Unitário

*P* – Potência

### 2.6.3 Custo Anual

Em posse do custo total e obtendo-se o fator de recuperação do capital investido (*f<sub>rc</sub>*), calcula-se o custo anual por:

$$CA = CT \cdot f_{rc} \quad (6)$$

Sendo:

$CA$  – Custo Anual

$CT$  – Custo Total

$f_{rc}$  – Fator de Recuperação de Capital

O fator de recuperação do capital investido é obtido pela equação (7).

$$f_{rc} = \frac{ix(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (7)$$

Onde  $N$  é o tempo de vida econômica ou útil da GCH e  $i$  a taxa de atratividade. Considera 30 anos para o valor de  $N$ , com base na vida útil dos equipamentos. Para a taxa de atratividade, foi considerado o valor de 6,5% (Taxa Selic).

#### 2.6.4 Benefício Anual

Obtém-se o Benefício Anual de acordo com a equação (8).

$$BA = 8760 \cdot E_m \cdot TE \cdot 0,8 \quad (8)$$

Sendo  $E_m$  a energia média gerada e  $TE$  a tarifa de energia, considerada para este estudo o valor de 190,22 (R\$/kWh) (CCEE, 2019) Os valores de 8760 e 0,8 são respectivamente, o total de horas em um ano e os impostos estimados descontados na receita do empreendimento juntamente com um período no ano para eventuais manutenções.

#### 2.6.5 Benefício Líquido

O Benefício Líquido anual é a diferença entre benefício anual e o custo anual obtido por:

$$BL = BA - CA \quad (9)$$

Onde:

$BL$  – Benefício Líquido

$BA$  – Benefício Anual

$CA$  – Custo Anual

### 2.7 Critério de Motorização

O critério de motorização adotado para a CGH foi baseado na teoria econômica, buscando-se o maior lucro possível. Portanto, a vazão de projeto será determinada pelo método do *Máximo*

*Benefício Líquido.* Este método relaciona o Benefício Líquido com a potência instalada. Para o Máximo Benefício Líquido, deve-se obter sua primeira derivada em relação a potência e igualar a zero de acordo com a equação (10) (Z. Souza, 2009).

$$\text{Máx}BL \rightarrow \frac{\partial BL}{\partial P} = 0 \quad (10)$$

Tendo-se a primeira derivada do benefício anual e do custo anual, ambos em relação a potência e fazendo as manipulações algébricas necessárias, chega-se a conclusão que a variação do benefício anual é igual a variação do custo anual.

$$\begin{aligned} \frac{\partial BL}{\partial P} &= \frac{\partial BA}{\partial P} - \frac{\partial CA}{\partial P} \\ \frac{\partial BA}{\partial P} - \frac{\partial CA}{\partial P} &= 0 \\ \frac{\partial BA}{\partial P} &= \frac{\partial CA}{\partial P} \\ \frac{\partial BA}{\partial CA} &= 1 \end{aligned} \quad (11)$$

A equação (11), conhecida como Ótimo de Pareto, indica que o Máximo Benefício Líquido é atingido quando a variação do Benefício Anual ( $\partial BA$ ) for igual a variação do Custo Anual ( $\partial CA$ ). Dessa maneira, quando a relação entre  $\left(\frac{\partial BA}{\partial CA}\right)$  for unitária, têm-se os valores de vazão de projeto, potência, energia média gerada, custo total, benefício anual e benefício líquido.

## 2.8 Grupos Geradores

Os grupos geradores são o coração das Centrais Hidrelétricas, uma vez que atuam diretamente na conversão de energia, estabilidade e segurança operacional dos sistemas que conduzem e suportam as massas energéticas (Z. Souza, 2009). Para obter o número de grupos geradores e o tipo de turbina a ser utilizado, necessita avaliar de forma iterativa a sua respectiva rotação, rotação específica e altura de sucção.

### 2.8.1 Turbina Escolhida

Para selecionar o modelo de turbina mais adequado para cada central hidrelétrica, vários fatores devem ser levados em consideração, sendo entre eles a vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e a queda bruta (m). Consultando-se o campo de aplicação de turbinas hidráulicas vista na Figura 1, tem-se o diagrama de operação das turbinas Francis, Pelton, Kaplan e Michell-Banki (Henn, 2006).

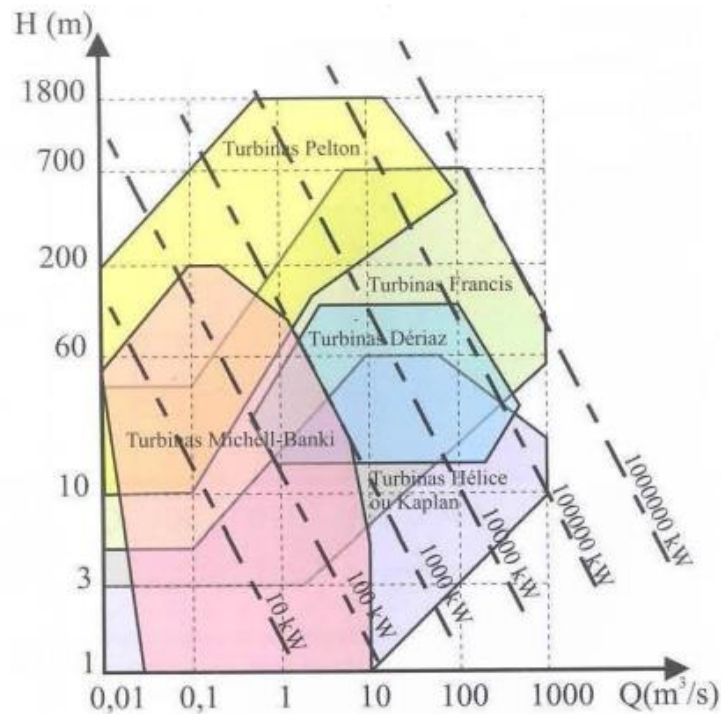


Figura 1: Campo de Aplicação das Turbinas

## 2.9 Rotação, Rotação Específica, Coeficiente de Cavitação de Thoma e Altura de Sucção

Para obter a rotação ( $n$ ) da turbina hidráulica, deve-se fazer um processo iterativo em função da grandeza chamada altura de sucção ( $H_{su}$ ). A altura de sucção é a diferença entre o nível do rotor da turbina e o nível de jusante, calculada com o intuito de proteger o sistema hidráulico do fenômeno da cavitação. Este fenômeno caracteriza-se pela implosão de bolhas de gás devido à mudança brusca de pressão. Assim, tem-se a rotação dada pela equação (12) (Z. Souza, 2009).

$$n = \left( \frac{3600}{z_p} \right) \quad (12)$$

Onde:

$n$  – Rotação (rpm)

$z_p$  – Número de pares de polos do gerador

Tendo-se a rotação  $n$ , faz-se necessário o cálculo da rotação específica da turbina, dada por (Z. Souza, 2009):

$$n_q A = 3 \cdot n \cdot \left( \frac{Q^{0,5}}{H^{0,75}} \right) \quad (13)$$

$n_q A$  – Rotação específica

Calcula-se, portanto, o coeficiente de cavitação de *Thoma* para turbina Tipo Francis de acordo com a equação (14) (Z. Souza, 2009).

$$\sigma = 0,0245 \cdot e^{0,00833 \cdot nqA} \quad (14)$$

Para turbina hidráulica axial, tem-se (Z. Souza, 2009):

$$\sigma = 1,266 \cdot 10^{-5} \cdot nqA^{1,75} \quad (15)$$

De posse do coeficiente de cavitação de *Thoma*, calcula-se a altura máxima de sucção. A equação é dada por (Z. Souza, 2009):

$$H_{su} = 10 - 0,00122 \cdot Zb - \sigma \cdot H \quad (16)$$

## 2.10 Número de Grupos Geradores

Sendo conhecidas as vazões de projeto ( $Q$ ) e a vazão mínima a ser turbinada ( $Q_{min}$ ) por uma única máquina, o número de grupos geradores é obtido pelo quociente destas duas vazões, de acordo com a equação (17) (Z. Souza, 2009).

$$NGG = fi \cdot \frac{Q}{Q_{min}} \quad (14)$$

Para determinar o valor da constante  $fi$ , utiliza-se a equação (14) (Z. Souza, 2009).

$$fi = 0,248 + 2,714 \cdot 10^{-3} \cdot nqA - 3,403 \cdot 10^{-6} \cdot nqA^2 \quad (15)$$

## 2.11 Análise Econômica

A análise econômica de uma CGH é o estudo que determina a viabilidade do projeto, pois todos os estudos apresentados anteriormente são premissas para a determinação da estimativa de orçamento. O intuito principal desta análise é o retorno financeiro gerado, pois o resultado do projeto pode ser positivo, mas só será atrativo para o investidor se o lucro gerado for maior do que o lucro que poderia ser obtido em outros tipos de investimentos no mercado financeiro. Portanto, para se determinar se o resultado é positivo e atrativo para o investidor é preciso realizar o estudo dos indicadores financeiros do projeto. Neste estudo utiliza-se o Valor Presente Líquido (VPL).



O VPL determina o valor presente de pagamentos futuros permitindo induzir que se o valor for maior que zero, o projeto é atrativo, se igual a zero é indiferente e se menor do que zero o projeto não é viável (Haroldo, 2002). O VPL pode ser calculado por:

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{FCt}{(1+i)^t} \quad (16)$$

t = período (meses)

n = tempo total do projeto

i = TMA (taxa mínima de atratividade)

FCt = Fluxo de Caixa do Período

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Curva de Duração de Potência e Gráfico de Energia

Inicialmente, obteve-se a curva de duração da potência a partir da curva de duração das vazões, visualizada pela Figura 2.

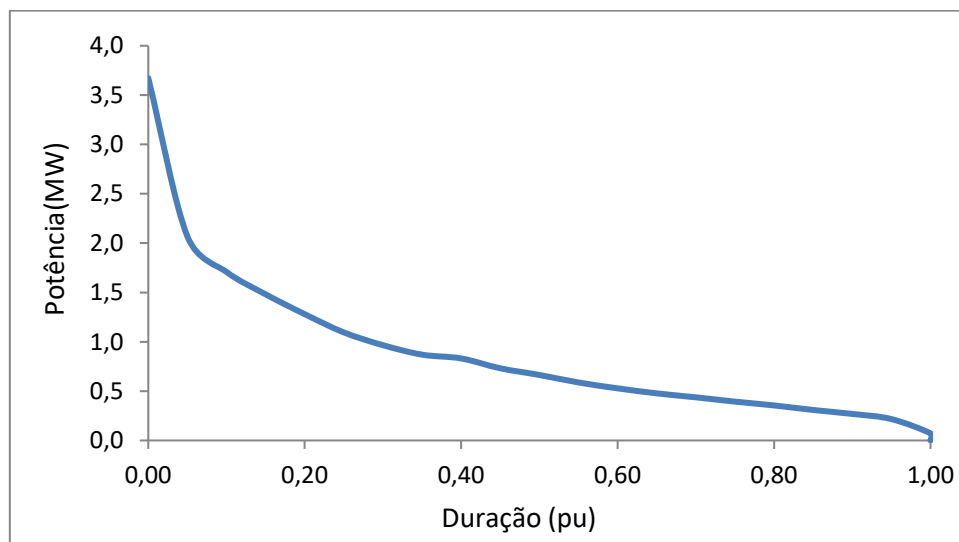


Figura 2: Curva de Duração das Vazões

A partir da curva de duração de potência, obtém-se a curva de energia versus potência instalada.

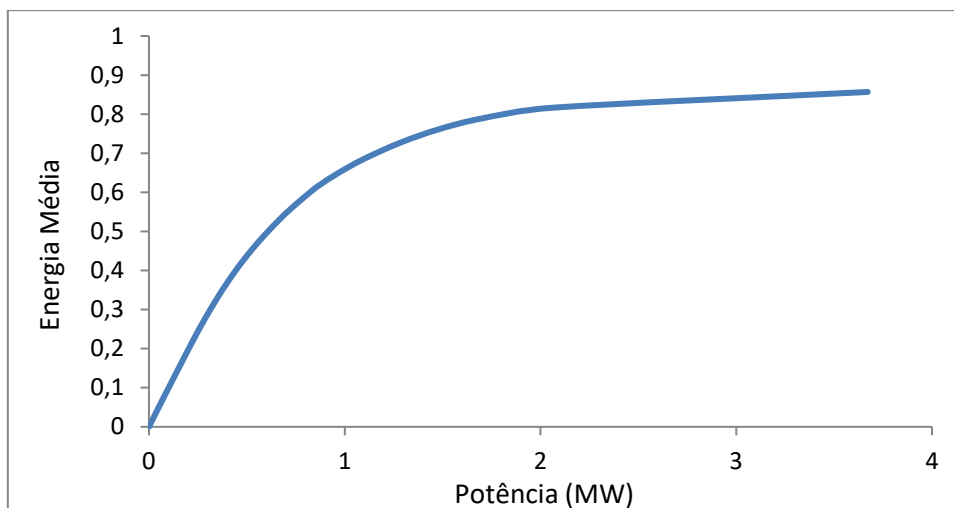


Figura 3: Energia x Potência

### 3.2 Critérios de Motorização

Utilizando o máximo benefício líquido, quando a variação do Benefício anual iguala à variação do custo anual, encontra-se uma vazão de projeto de 4,97 m<sup>3</sup>/s e uma potência instalada de 0,86 MW.

### 3.3 Grupos Geradores

Considerando a altitude do local (Zb) de 840 metros, faz-se a escolha da rotação  $n$  (rpm) da turbina considerando-se e otimizando-se os custos dos equipamentos mecânicos, hidromecânicos, obras civis por meio da altura da sucção (Hsu).

Tabela 1: Método Iterativo para Obter melhor altura de Sucção

n[rpm]	n[rps]	nqA	$\sigma$	Hsu
900	15	493,12	1,49	-22,31
720	12	394,5	0,66	-4,78
600	10	328,75	0,38	1,02
514	8,57	281,62	0,26	3,6

Dessa maneira, a turbina hidráulica é do tipo Francis com rotação igual a 600 rpm e altura de sucção de 1,02 m. Calcula-se o número de grupos geradores pelas equações (14) e (15). Para uma rotação específica de 328,75, tem-se um valor final de 2 grupos geradores (NGG).

### 3.4 Análise Econômica

Pelo critério de motorização adotado, o benefício anual obtido é perto de R\$ 820000,00, com um custo anual de R\$ 455000,00. O custo da CGH é de R\$ 4,47 milhões. Dessa maneira, depois de 17 anos o empreendimento é amortizado. O VPL, ao final de 30 anos é positivo, correspondendo a uma análise financeira viável.

#### **4 CONCLUSÃO**

Diante do exposto, pode-se concluir que o projeto de implantação da CGH é um empreendimento viável, fato justificável através de uma análise econômica e estrutural dos parâmetros determinados nos respectivos cálculos. Os parâmetros obtidos no projeto da CGH foram a vazão de projeto igual a 4,97 m<sup>3</sup>/s, potência instalada de 0,87 MW e um custo final de implantação igual a R\$ 4,47 milhões. De acordo com a vazão de projeto e uma queda bruta de 21 metros, a turbina hidráulica a ser usada será tipo Francis com 2 grupos geradores. Disposto de tais informações e de uma análise econômica que garantiu sua viabilidade para com o mesmo, levando em consideração fatores determinísticos em tomadas de decisões quanto à implantação de projetos que são o valor presente líquido (VPL), conclui-se pela resposta dos resultados que com um valor de VPL positivo com um retorno esperado atrativo para o investidor.

#### **5 AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem o Centro Universitário de Itajubá (FEPI) pelo suporte financeiro concedido.

#### **6 REFERÊNCIAS**

Aneel (2014). “Micro e Minigeração Distribuída. Sistema de Compensação de Energia Elétrica”.

BRASIL, H. G (2002). “Avaliação Moderna de Investimentos”. Ed. QUALITYMARK.

EPE (2019). “Matriz Energética e Elétrica”. Disponível em <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#ELETRICA>. Acesso em 17 de junho de 2019

Oliveira, M. A. (2018). “Modelo para análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental da repotenciação de pequenas centrais hidrelétricas”. Cerpch.

Tiago F.G.L. (2011) “Viabilidade econômico financeiro do desenvolvimento de projetos de PCHs” -VII Conferência de Centrais Hidrelétricas, Centro de Convenções do Novotel Center Norte, Av. Zaki Narchi, nº500 – São Paulo – SP, 03 e 04 de Agosto de 2011.

Z. Souza, A.H.M. Santos e E.C. Bortoni. (2009) “Centrais Hidrelétricas”, Ed. Interciência.

CCEE (2019) “Preço semanal”. Disponível em [https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/precos/historico\\_preco\\_semanal](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/precos/historico_preco_semanal). Acesso em 16 de Abril de 2019