

# PROJETOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

GERALDO MAGELA PEREIRA

Nos anos 1970, com o país em desenvolvimento acelerado, nós tínhamos muitos projetos de usinas hidrelétricas para fazer. Naquela época não tínhamos nem experiência, expertise, os consultores e os livros eram estrangeiros e caros.

Tempos difíceis. Foi tanto sufoco que pensei “um dia, vou escrever um livro”, e esse sonho foi concretizado 40 anos depois com a publicação do “Projetos de Usinas Hidrelétricas-Passo a Passo” pela Editora Oficina de Textos.

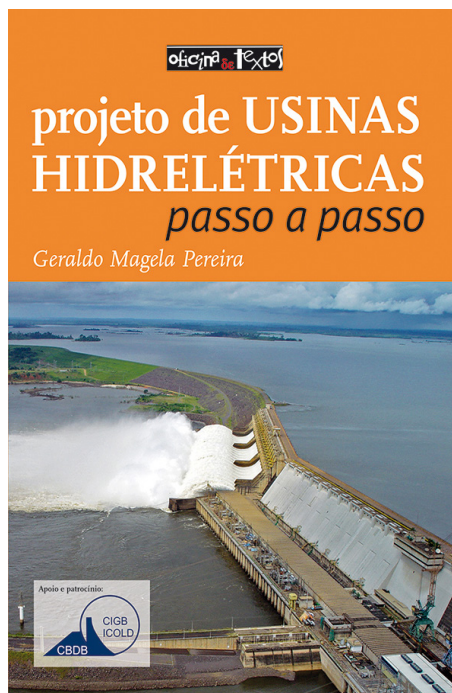


Figura 1. Livro Projeto de Usina Hidrelétricas - Passo a Passo”

O texto apresenta para a RBGEA, a revista da ABGE, um resumo em notas sobre alguns pontos

que merecem ser considerados na definição do arranjo geral das estruturas que compõem uma usina hidrelétrica. Apresentam-se também alguns exemplos de usinas hidrelétricas com diferentes composições de arranjo das estruturas.

Desde o início, ressalta-se que as condições topográficas e geológico-geotécnicas dos sítios condicionam fortemente os arranjos das usinas, e acima de tudo, a importância da multidisciplinaridade no desenvolvimento do projeto, com a integração das disciplinas da Cartografia, Topografia, Hidrologia, Geologia, Geotecnia, Estruturas, Hidráulica, Mecânica, Elétrica e Meio Ambiente.

## 1 TRANSFORMAÇÃO DA ENERGIA POTENCIAL EM ENERGIA ELÉTRICA

A geração de energia elétrica a partir de uma usina hidrelétrica acontece pela transformação da energia potencial associada ao fluxo fluviométrico e à diferença de nível d’água criada pela existência de quedas, degraus ou corredeiras no caminho do rio.

Todas as estruturas civis, equipamentos mecânicos e sistemas elétricos da usina são definidos em função do potencial de geração que o curso d’água oferece e a definição do arranjo das estruturas e do tipo dos equipamentos eletromecânicos é feita de forma a propiciar seu melhor aproveitamento. A figura a seguir apresenta um croqui clássico do esquema de transformação da energia potencial em energia elétrica por meio de usina hidrelétrica.

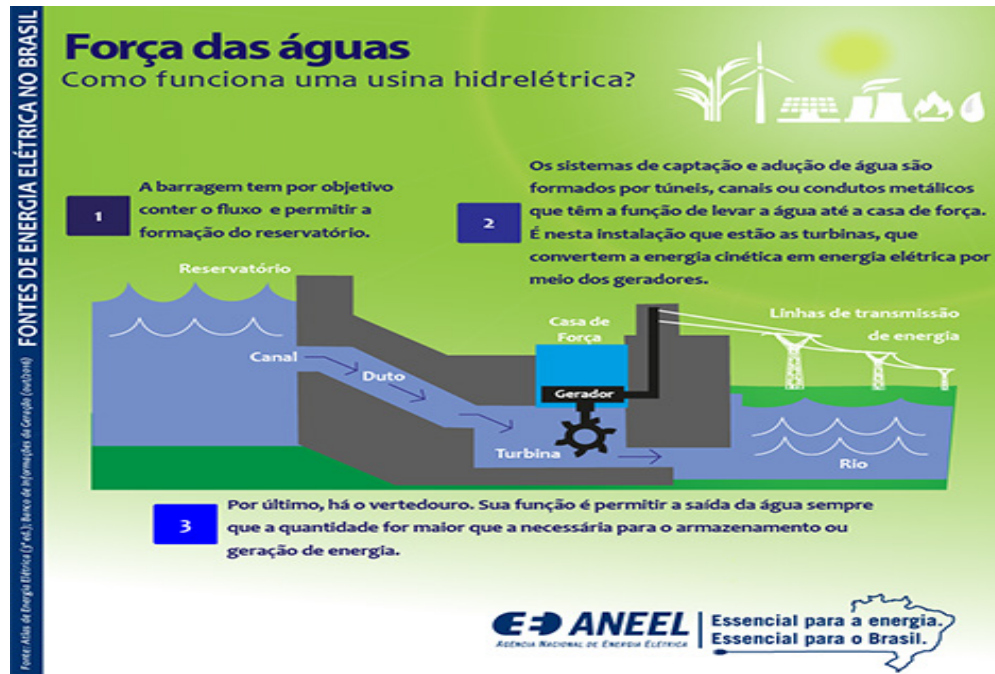


Figura 2. Geração de energia elétrica através de usinas hidrelétricas (fonte: ANEEL)

A vazão de fluxo e a diferença de nível de água são as características do rio que definem o potencial de geração de energia elétrica de um aproveitamento hidrelétrico. Desta forma, a potência da usina é obtida pela expressão:

$$P = H \times Q \times g \times h$$

onde:

P = potência instalada (kW)

Q = vazão do rio (m<sup>3</sup>/s)

H = diferença de nível d'água ou queda (m)

g = aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>)

h = rendimento dos equipamentos (%)

## 2 ETAPAS DE ESTUDOS E PROJETOS DE UM APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO

Os estudos para a identificação, avaliação, projeto e implantação dos empreendimentos hidrelétricos são desenvolvidos em etapas, cada uma avançando em conhecimento e detalhamento. As etapas são:

- i. Estimativa do Potencial Hidrelétrico: fase que em se procede a análise preliminar das características da bacia hidrográfica, especialmente quanto aos seus

aspectos topográficos, hidrológicos, geológicos e ambientais. Sua finalidade é verificar a vocação da bacia para a geração de energia elétrica.

- ii. Estudos de Inventário Hidrelétrico: fase em que se determina o potencial hidrelétrico da bacia hidrográfica e se estabelece o melhor posicionamento dos aproveitamentos hidrelétricos, que em conjunto ofereçam o máximo de energia ao menor custo e com o mínimo de impacto ao meio ambiente. Por ele fica definida a divisão de quedas no rio principal e em seus afluentes que formam a bacia hidrográfica.
- iii. Estudos de Viabilidade: fase que se define a concepção geral de um determinado aproveitamento que compõem a divisão de quedas de um rio. Sua finalidade é avaliar, otimizar e estabelecer as características técnico, econômica e ambiental do aproveitamento, analisando seus benefícios e custos associados.
- iv. Projeto Básico: fase em que o aproveitamento concebido nos Estudos de Viabilidade tem seu projeto efetivamente detalhado e desenvolvido, estabelecendo as características técnicas de suas

estruturas civis, dos seus equipamentos mecânicos e se seus sistemas elétricos, bem como de seus programas socioambientais.

- v. Projeto Executivo: fase em que são elaborados todos os documentos, relatórios, desenhos, memórias de cálculo, especificações técnicas, lista de materiais, programas e instruções necessários para a completa implantação do empreendimento hidrelétrico.

Os aproveitamentos hidrelétricos são classificados em função de sua capacidade de geração de energia elétrica, dada pela potência instalada estabelecida no projeto. Os empreendimentos são classificados em:

Central Geradora Hidrelétrica	CGH	$P \leq 5$
Pequena Central Hidrelétrica	PCH	$5 < P \leq 30$
Usina Hidrelétrica	UHE	$P > 30^*$

\* São caracterizados como UHEs os aproveitamentos com potência instalada superior a 5 MW e igual ou inferior a 50 MW desde que não sejam enquadrados como PCH e estejam sujeitos a outorga de autorização.

A experiência acumulada pelas décadas de desenvolvimento do setor hidrelétrico brasileiro possibilitou a elaboração de critérios, instruções, manuais e diretrizes que estabelecem padrões para o desenvolvimento de cada etapa de estudo dos aproveitamentos hidrelétricos<sup>1</sup>. Dentre eles, citam-se:

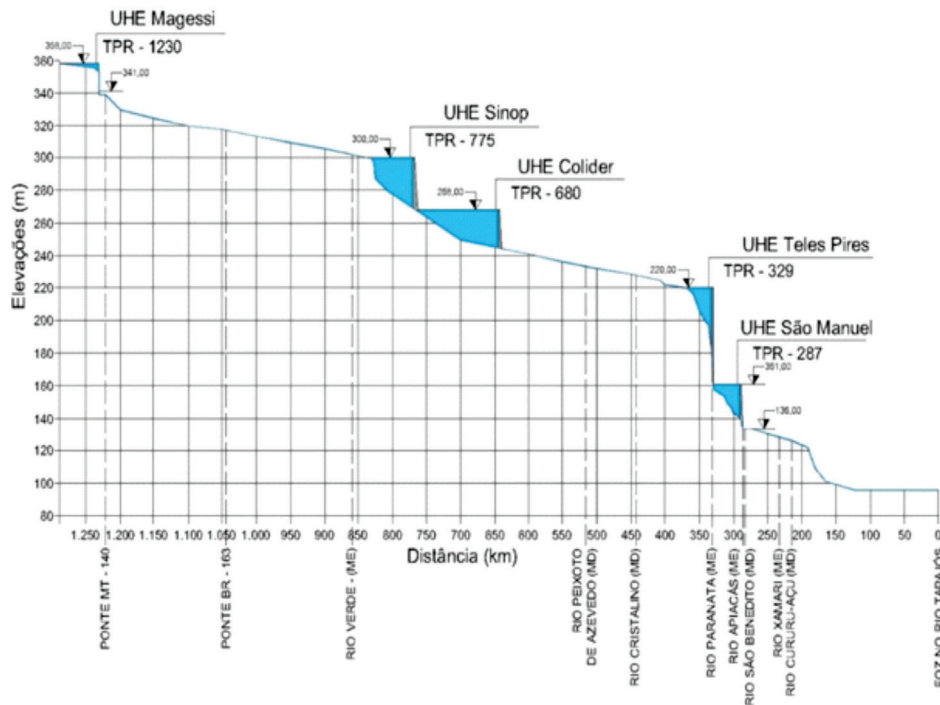
- Manual de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas;
- Instruções para Estudos de Viabilidade de Aproveitamentos Hidrelétricos;
- Diretrizes para Elaboração de Projeto Básico de Usinas Hidrelétricas;
- Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas;
- Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas

A figura a seguir apresenta as usinas do rio Teles Pires, na região Norte, uma das últimas a ser totalmente aproveitada no país. Ele se junta ao rio Juruena para juntos formarem o rio Tapajós.



Figura 3. Localização da Bacia Hidrográfica do rio Tapajós, formado pela junção dos rios Teles Pires e Juruena.

<sup>1</sup> <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>



**Figura 4.** Divisão de quedas do rio Teles Pires indicando os Aproveitamentos Hidrelétricos identificados no respectivo Estudo de Inventário.

### 3 NOTAS SOBRE DADOS E DISCIPLINAS FUNDAMENTAIS

**Cartografia e Topografia:** é preciso ter uma base cartográfica e levantamentos topográficos em escala adequada para possibilitar à determinação da queda bruta (H) do empreendimento, e para possibilitar a avaliação das alternativas de arranjo e o desenvolvimento do projeto da usina.

**Hidrologia:** os estudos hidrológicos definem as vazões médias máximas e mínimas características do rio as quais, junto com a queda ou desnível, serão utilizadas nos estudos energéticos para determinação da potência a ser instalada na usina e do dimensionamento das estruturas hidráulicas da usina.

**Geologia e Geotecnia:** é necessário ter a correta caracterização e parametrização do ambiente geológico que irá hospedar a usina, notadamente quanto suas propriedades de resistência, deformabilidade e permeabilidade.

**Ambiental:** é de extrema importância verificar e quantificar os aspectos e as condicionantes socioambientais locais e regionais, estabelecendo diagnósticos e prognósticos para as interações

entre o empreendimento e o meio ambiente onde estará inserido.

Demais disciplinas: Estruturas Cívicas, Hidráulica; Arquitetura; Engenharia Mecânica, Engenharia Elétrica; Sistema de Transmissão.

Por isso, fica claro que o desenvolvimento dos estudos e projetos de empreendimentos hidrelétricos é realizado necessariamente por uma equipe multidisciplinar composta por profissionais representantes de cada dessas disciplinas. A estes juntam-se ainda os profissionais de planejamento, orçamentação, coordenação e interface.

### 4 ARRANJOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

A definição do arranjo das estruturas da usina hidrelétrica é uma das tarefas mais importantes dos estudos pois através de um arranjo bem elaborado, que considere as características fluviais, geomorfológicas e geológicas do local, se obtém a melhor alternativa, com a maior viabilidade técnica, econômica e ambiental para a implantação do empreendimento.

De forma resumida, existem 2 tipos mais comuns de arranjo:

- Arranjos compactos: onde todas as estruturas da usina ficam posicionadas ao longo do eixo de barramento;
- Arranjos com circuito de adução: onde a estrutura do barramento, que estabelece o reservatório, e a estrutura da casa de força, que abriga as unidades turbogeradoras, estão desassociadas e separadas, e o fluxo hidráulico é conduzido do reservatório à casa de força por meio de um circuito hidráulico de adução.

Cada caso tem suas particularidades e as alternativas mais econômicas, técnica e ambientalmente, são objeto de pesquisas, análises

e verificações durante os estudos e projetos dos empreendimentos.

Nos livros do Comitê Brasileiro de Barragens, *Topmost Dams of Brazil* (CBDB, 1978) e *“Main Brazilian Dam.”* Vol. 1 (CBDB, 1982), Vol. 2 (CBDB, 2000) e Vol. 3 (CBDB, 2009), encontram-se ilustrados os principais projetos das usinas hidrelétricas brasileiras. Esses documentos são da maior importância e de consulta imprescindível para quem trabalha para o setor elétrico. Neles constam, com alguns detalhes, os arranjos gerais das principais obras brasileiras. Não será difícil observar que, para locais com características semelhantes.

A seguir são apresentados alguns exemplos de arranjo utilizados em usinas no Brasil, ilustrando o uso dos 2 tipos de arranjo acima identificados.



**Figura 5.** UHE Tucuruí – Arranjo Compacto. Situa-se no trecho baixo do rio Tocantins, no Estado do Pará, com potência de 8.125 MW. A barragem tem 95 m de altura e comprimento de 7 km. O vertedouro da usina, um dos maiores do mundo, tem 23 vãos de 20 m largura e 21 m altura e capacidade de vertimento (Q) de 110.000 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 6.** UHE Itaipu - Arranjo Compacto. Situa-se no rio Paraná e tem potência de 14.180 MW. A barragem tem 196 m de altura e 7,8 km comprimento. O vertedouro tem 14 vãos de 20 m largura e 21,34 m altura e capacidade de vazão de 62.000 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 7.** UHE Campos Novos – Arranjo com Circuito Adutor. Situa-se no rio Canoas, 21 km a montante da confluência com o rio Pelotas, e tem potência de 900 MW. A barragem, de enrocamento com face de concreto, tem 202 m de altura e 590 m de comprimento. O vertedouro tem 4 vãos de 17,4 m largura e 20 m altura. A capacidade de vazão é de 18.300 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 8.** UHE Irapé – Arranjo com Circuito Adutor. Situada no rio Jequitinhonha, Minas Gerais, possui a maior barragem do Brasil e a segunda maior da América Latina, com 205 m de altura. Possui 360 MW de potência instalada. O arranjo compreende uma barragem de enrocamento com núcleo de argila fechando o vale, túneis de desvio na margem direita, tomada de água, vertedouro e extravasor na margem esquerda e casa de força a jusante da barragem.

## 5 ESTUDOS SEDIMENTOLÓGICOS E DE VIDA ÚTIL DOS RESERVATÓRIOS

Além de todos os recursos mobilizados para a elaboração dos estudos e dos projetos das estruturas civis e para a definições e especificações dos equipamentos mecânicos e dos sistemas elétricos da usina, é necessário também prestar atenção ao reservatório. Não são raros os problemas de redução do volume do reservatório em função do assoreamento ao longo do tempo.

A produção de sedimentos envolve muitos fatores associados ao ambiente geológico, às características geomorfológicas da bacia, à pluviosidade, aos ventos e às ações antrópicas. Para a avaliação da vida útil do reservatório deve-se escolher a estação com medições sedimentométricas mais próxima ao projeto, cujos dados estejam disponíveis no Hidroweb/ANA.

O tema vem merecendo atenção crescente por parte dos projetistas, pesquisadores e agências de financiamento de todo o mundo. A revista *World Water* (1988 apud Almeida e Carvalho, 1993), cita um estudo do Banco Mundial, realizado em 1974, indicando que a expectativa média de vida útil dos reservatórios mundiais havia decrescido de 100 para 24 anos.

Power (1988), no artigo “Siltation is Threat to Whole World’s Storage Dams”, registrou que: o reservatório da Usina Hoover (1935) está assoreando 0,3% ao ano, portanto, já perdeu 24% do seu reservatório em 79 anos, aproximadamente; Tarbela está assoreando 1,5% ao ano; e Três Gargantas, inaugurada em 1970, está assoreando 1,7% ao ano; e que o reservatório de Warsak, no rio Kabul no Paquistão, perdeu 18% de sua capacidade no seu primeiro ano de operação.

White (2010), no trabalho “World Water: Resources, Usage and the Role of Man-Made Reservoirs”, apresentou dados de 2.300 reservatórios em 31 países fornecidos pelo ICOLD (2003), “World Register of Dams”. Ele citou que a perda anual de armazenamento é de 0,5% ao ano. Citou também a meia vida dos reservatórios de 12 regiões do mundo. Para a América do Sul essa meia vida é de 500 anos.

Segundo Carvalho (1994) registra que no Brasil, nossa perda também é de 0,5% ao ano.

O Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatório<sup>2</sup> publicado pela Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas da ANEEL

<sup>2</sup> [https://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2000\\_GuiaAvaliacaoAssoreamentoReservatorios.pdf/68c4953-f696-5925-573a-b7b3207db875](https://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2000_GuiaAvaliacaoAssoreamentoReservatorios.pdf/68c4953-f696-5925-573a-b7b3207db875)

fornecem orientações e recomendações para a avaliação do impacto dos sedimentos carregados pelos cursos d'água aos reservatórios neles instalados.

A Tabela 1 apresenta os resultados desses estudos desenvolvidos para o Projeto Básico da PCH Poço Fundo, localizada no município de São José do Vale do Rio Preto.

No caso da PCH Poço Fundo verificou-se que não eram esperados problemas de assoreamento. O reservatório é estreito e pouco profundo, com considerável velocidade de escoamento, o que resultou em um baixo índice de sedimentação.

**Tabela 1.** Cálculo do Tempo de Assoreamento Previsto para o Reservatório da PCH Poço Fundo.

Sigla	Descrição / Fórmula	Un.	Valor
AD	Área de drenagem	(km <sup>2</sup> )	730
Q <sub>mlt</sub>	Descarga líquida média de longo período	(m <sup>3</sup> /s)	16,86
L	Comprimento do reservatório	(m)	5.191
NA <sub>res</sub>	Nível d'água máximo normal do reservatório	(m)	691,00
A <sub>res</sub>	Área do reservatório no NA máximo normal	(10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> )	140
V <sub>res</sub>	Volume do reservatório no NA máximo normal	(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	0,47
Q <sub>st</sub>	Descarga sólida média de longo período	(t/ano)	43.518
IS	Índice de Sedimentação = $V_{res}^2 / (Q^2 \times L)$	-	1,83 E+05
ER	Eficiência de retenção **(dado pela curva de Churchill)	(%)	20%
Pc	Porcentagem de argila contida no sedimento	(%)	25%
Pm	Porcentagem de silte contida no sedimento	(%)	25%
Ps	Porcentagem de areia contida no sedimento	(%)	50%
Wc	Coefficiente de compactação da argila*	-	0,416
Wm	Coefficiente de compactação do silte*	-	1,121
Ws	Coefficiente de compactação da areia*	-	1,554
Kc	Constante dependente do tipo de operação do reservatório (argila)*	-	0,256
Km	Constante dependente do tipo de operação do reservatório (silte)*	-	0,091
Ks	Constante dependente do tipo de operação do reservatório (areia)*	-	0,000
K	Constante dependente do tipo de operação do reservatório (total)*	-	0,087
g <sub>i</sub>	Peso específico aparente inicial = $Wc \times Pc + Wm \times Pm + Ws \times Os$	(t/m <sup>3</sup> )	1,161
T'	Tempo de assoreamento (cálculo inicial) = $V_{res} \times g_i / (Q_{st} \times ER)$	(anos)	69,22
g <sub>T</sub>	Peso específico aparente médio em T anos (compactado) = $Kc \times Pc + Km \times Pm + Ks \times Ps$	(t/m <sup>3</sup> )	1,319
T	Tempo de Assoreamento (corrigido) = $V_{res} \times g_T / (Q_{st} \times ER)$	(anos)	78,63

\*Valores válidos para o caso de "sedimento sempre ou quase sempre submerso";  
 \*\*A eficiência de retenção obtida pela curva de Churchill para o sedimento em suspensão foi nula. Considerou-se 20% de retenção, referentes à porcentagem estimada para o sedimento do leito.

Entretanto existem vários de reservatórios de usinas no Brasil com algum tipo de problema associado ao acúmulo de sedimentos. O ambiente geológico, o regime pluviométrico e as grandes declividades da bacia são as principais causas naturais que favorecem a erosão do seu solo. Como causas antrópicas, destacam-se a proximidade de regiões de exploração de minérios a céu aberto e o

desmatamento extensivo nas margens dos cursos d'água.

Cita-se por exemplo o caso da UHE Mascarenhas (120 MW), inaugurada em 1974, o projeto não contemplou os estudos sedimentológicos, segundo Almeida e Carvalho (1993). Essa usina teve seu reservatório quase que totalmente assoreado em 1979, 5 anos após a inauguração e sua opera-



ção exigia dragagem permanente até a época da publicação do trabalho de Almeida e Carvalho (1993).

A UHE Funil, com 30 MW de potência instalada no rio das Contas, na Bahia, foi inaugurada em 1962 e teve as três unidades geradoras paralisadas no período de janeiro de 1992 a março de 1993. Para recolocar a usina em operação, foi necessário efetuar a dragagem de um volume de 33.000 m<sup>3</sup> do reservatório, e a retirada de 1.000 m<sup>3</sup> de sedimentos dos condutos forçados.

Coelho (1993) mostrou em sua Dissertação de Mestrado desenvolvida no Instituto de Geociências e Ciências Exatas UNESP que o reservatório da UHE Americana (SP) assoreou 8,9% em 40 anos, correspondente a 0,22% ao ano.

Miranda (2011) mostrou em sua Dissertação de Mestrado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, que o reservatório de Três Irmãos assoreou 14% entre 1975 e 2008, o que corresponde a 0,42% ao ano, e que as perdas de energia, de 1993, ano de funcionamento da primeira turbina, a 2008 seriam de 377 MWh/mês.

As pesquisas desenvolvidas na Universidade Estadual de Campinas mostram que o reservatório da UHE Barra Bonita, onde existe a eclusa que permite o tráfego fluvial, também sofre as consequências do assoreamento. Em menos de cinco anos, alguns pontos ficaram 12 m mais rasos, con-

forme levantamentos batimétricos realizados na região. Segundo a pesquisa, na época já não era possível navegar com embarcações de 2,9 m de calado. Neste trecho a hidrovia só funcionava, de forma plena, seis meses por ano e a tendência era de que isso piorasse com o aumento do assoreamento. Além do prejuízo para a geração de energia, havia o risco de paralisação do transporte de cargas no trecho que integra o traçado da hidrovia Tietê-Paraná.

A questão deve receber a atenção e ser monitorada pelos concessionários ou autorizados de geração de energia hidrelétrica de acordo com a Resolução Conjunta no 3, de 10 de agosto de 2010, da ANEEL e ANA, a qual estabelece as condições e os procedimentos a serem observados pelos concessionários de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos.

O assunto do assoreamento possui grande importância e relevância para a vida e a capacidade operacional das usinas hidrelétricas, para a manutenção da trafegabilidade das embarcações e para a qualidade socioambiental das bacias hidrográficas