



INSTITUTO DE  
ENGENHARIA

# Armazenamento de Energia

As vantagens Ambientais, Técnicas e Econômicas

## Vetores Energéticos: Água Represada

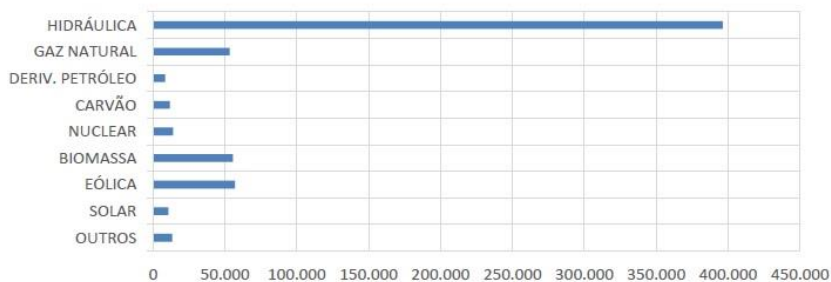
Antonio Lambertini

25/05/2023

# Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte GWh - 2020



**OFERTA INTERNA ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE  
GWh - 2020**



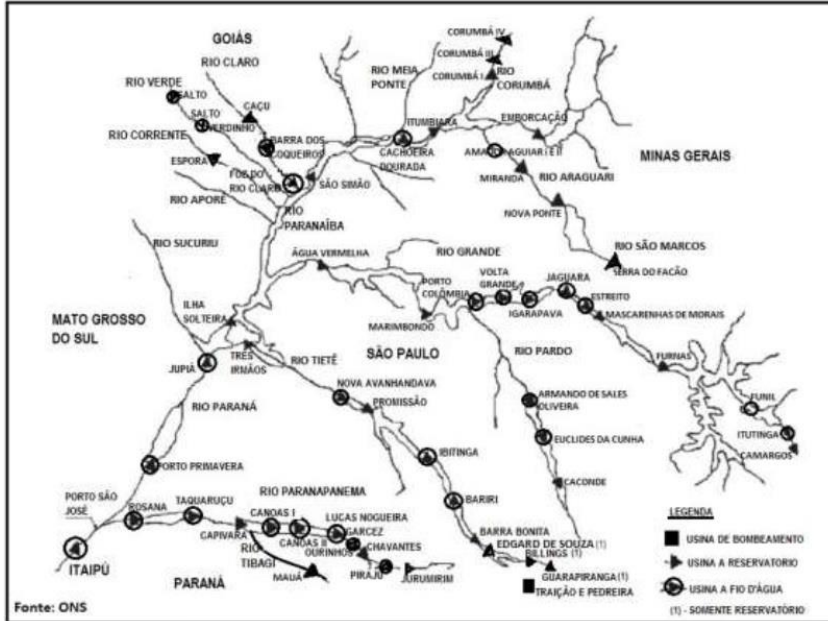
	OUTROS	SOLAR	EÓLICA	BIOMASSA	NUCLEAR	CARVÃO	DERIV. PETRÓLEO	GAZ NATURAL	HIDRÁULICA
■ 2020 - GWh	13.387	10.717	57.051	55.613	14.053	11.946	8.556	53.515	396.381

# Bacia do Rio Paraná

O exemplo brasileiro de armazenamento de energia utilizando águas represadas



# Cascata de Usinas Hidrelétricas (UHEs) na Bacia do Rio Paraná



Fonte: ONS

- 57 grandes reservatórios onde:
  - 28 UHEs a reservatório de acumulação
  - 29 a fio-d'água
  - 2 Usinas de bombeamento

Potencial Instalado 41 GW

Potencial de armazenamento até a UHE de Itaipu

- 154GWh
- uma das maiores do mundo
- operado pelo ONS

# UHEs na Bacia do Rio Paraná

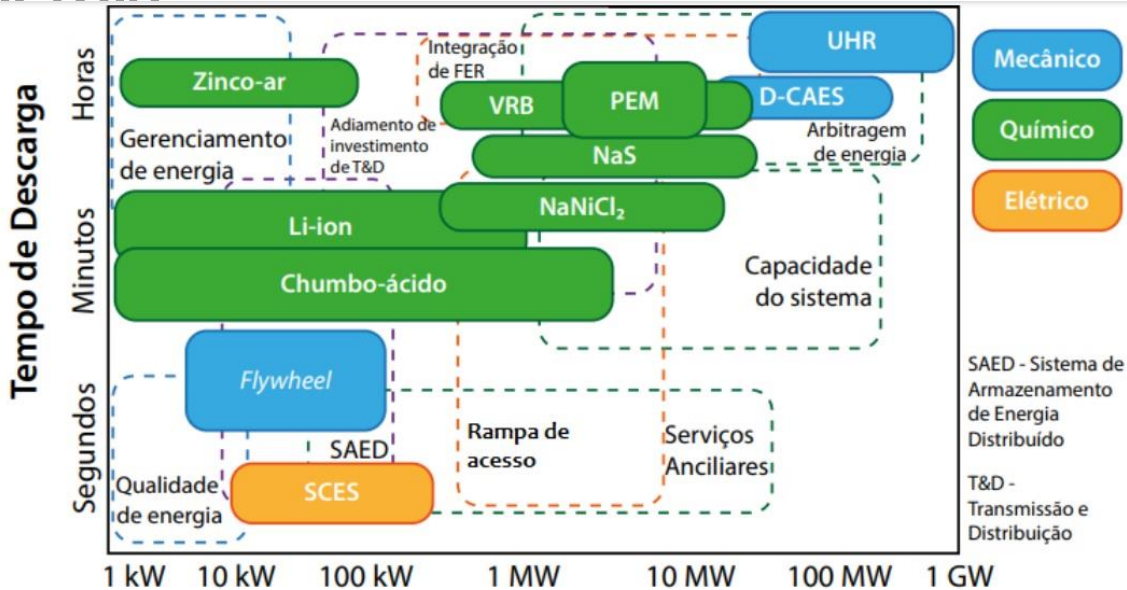


# Os vetores energéticos

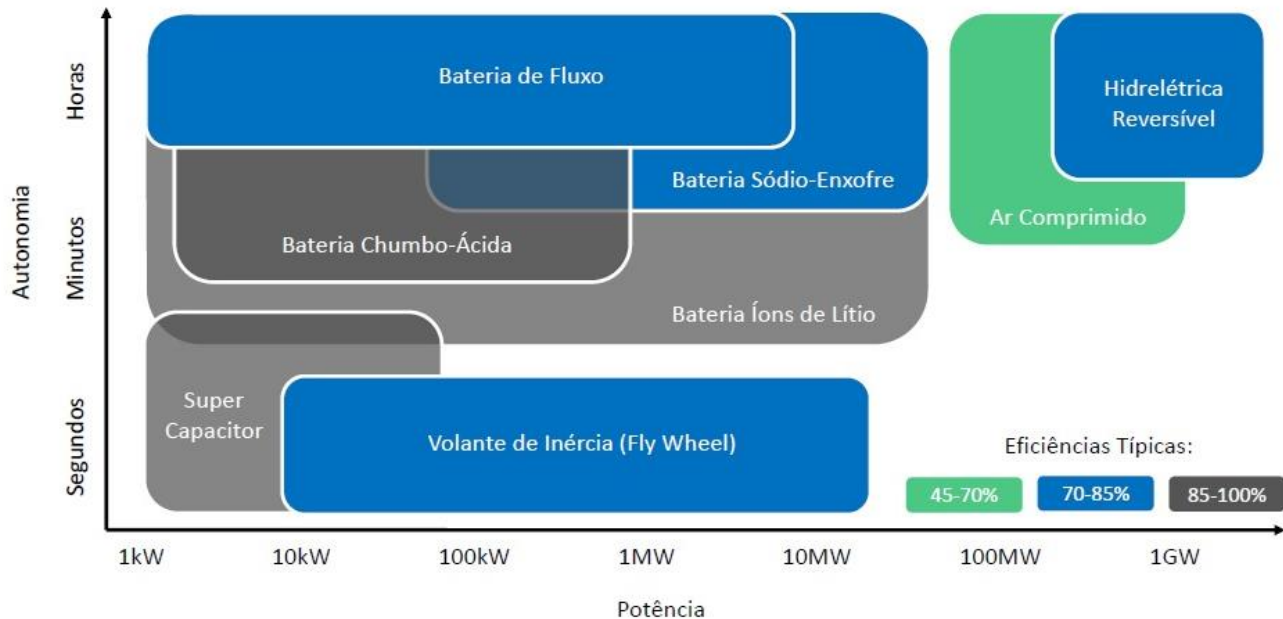
Os vetores energéticos são fontes de energia secundária, também chamada de intermediária posto que trata-se de uma substância ou dispositivo que armazena uma energia que já foi processada.

Podem ser mecânico, químico e elétrico

# Tecnologias de Armazenamento de Energia

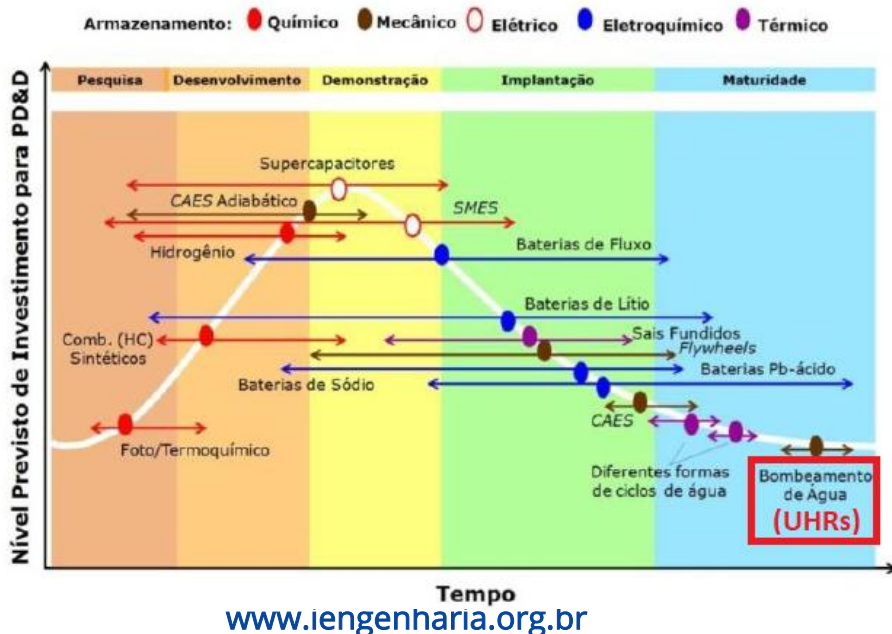


# Eficiência das Tecnologias





# Classificação dos sistemas de armazenamento de energia (de acordo com a natureza do processo)





---

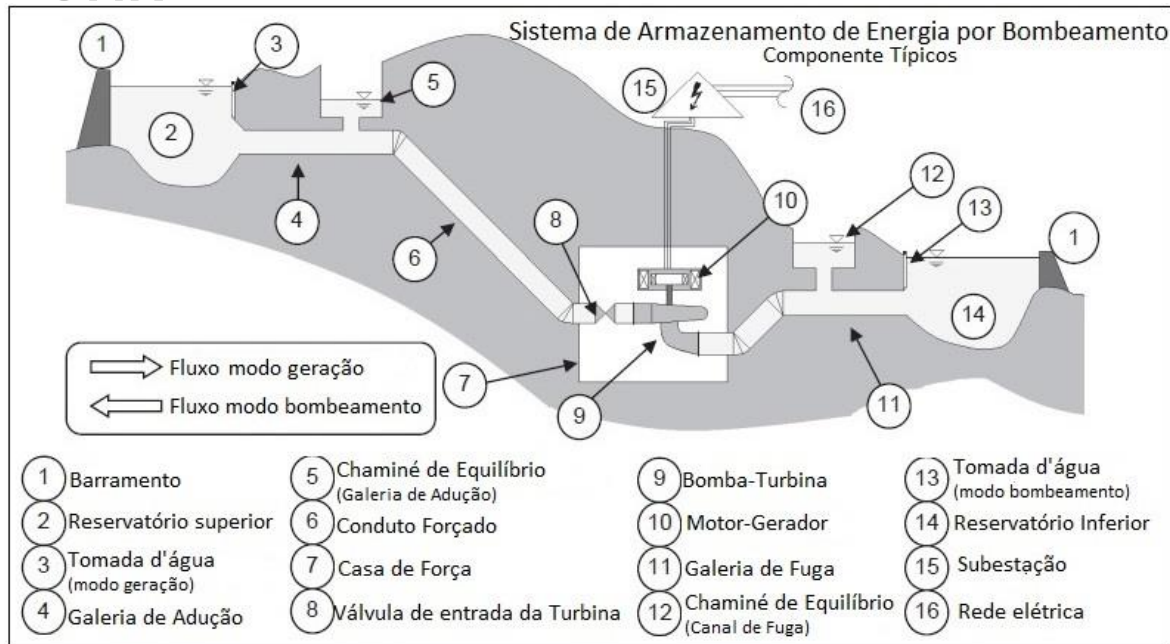
# As UHRs

# Usinas Hidrelétricas Reversíveis

Reservatório Guarapiranga

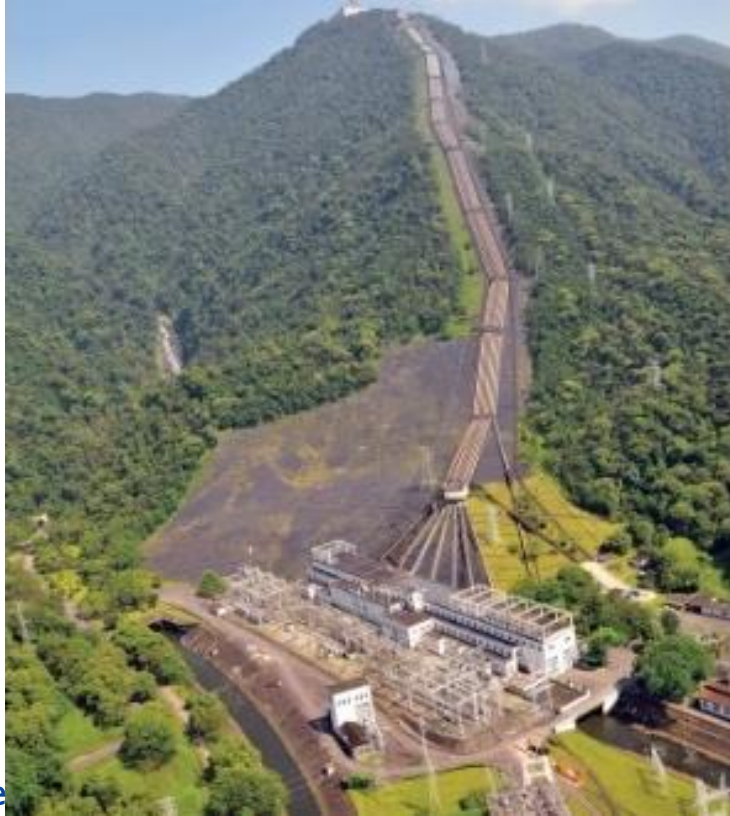
---

# A Usinas Hidrelétricas Reversíveis - UHR



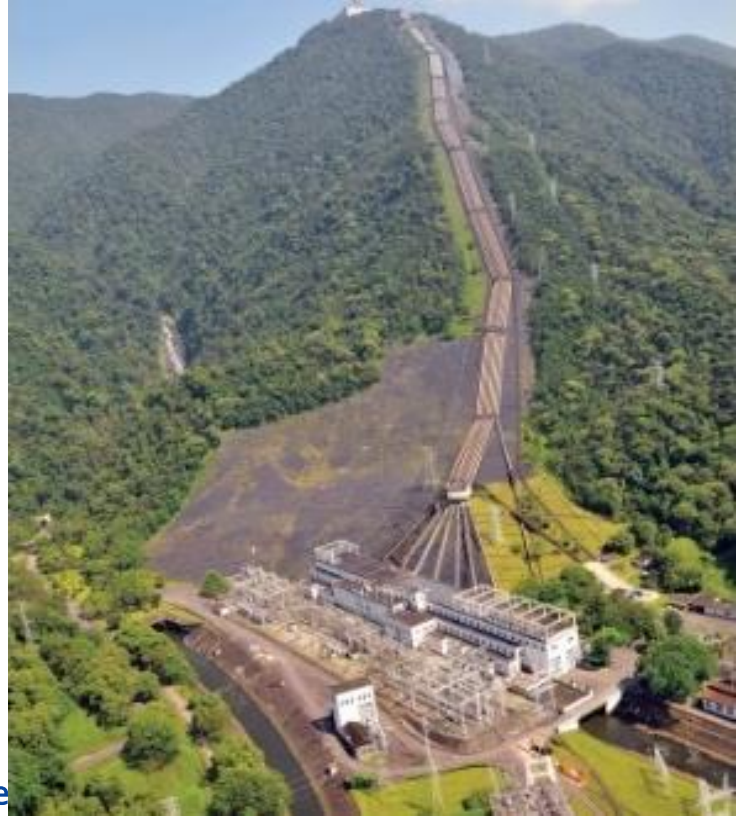
# As UHRs

- Diversas concepções construtivas e tecnologias;
- Possível proximidade com centros de carga;
- Longa vida útil;
- Alternativa (entre outras) para atender as necessidades do SIN.



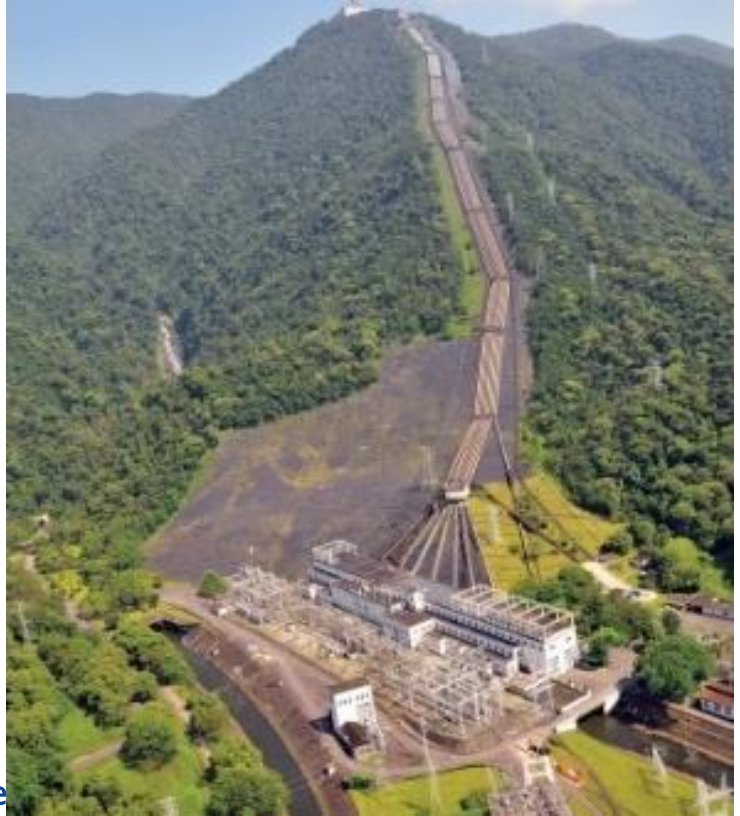
# APLICAÇÕES

- Suporte a fontes inflexíveis;
- Arbitragem de energia / Atendimento ponta;
- Flexibilidade / acompanhamento carga;
- Controle de frequência (+P, -P);
- Controle de reativos;
- Auto Restabelecimento (blackstart);
- Adiamento investimento transmissão;
- Usos múltiplos dos reservatórios;

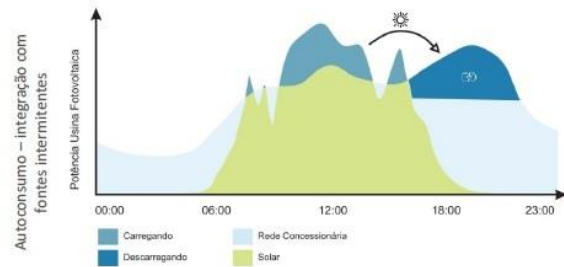
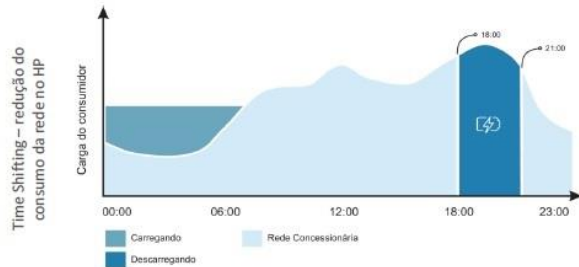
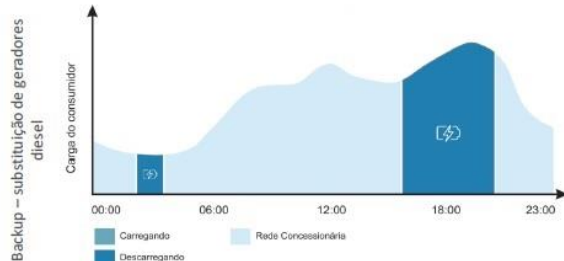
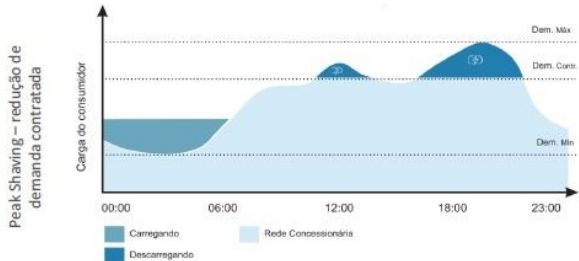


## DESAFIOS

- Capital intensivo;
- Baixa padronização: forte dependência com características locais.
- Longo tempo de estudos / licenciamento / construção (em relação a outras tecnologias);
- Usos múltiplos.
- Previsão/valoração dos benefícios no longo prazo. Dependência com diversas características do sistema;
- Regulação (comercialização dos diversos serviços, operação, outorga).
- Sinalização econômica das necessidades.

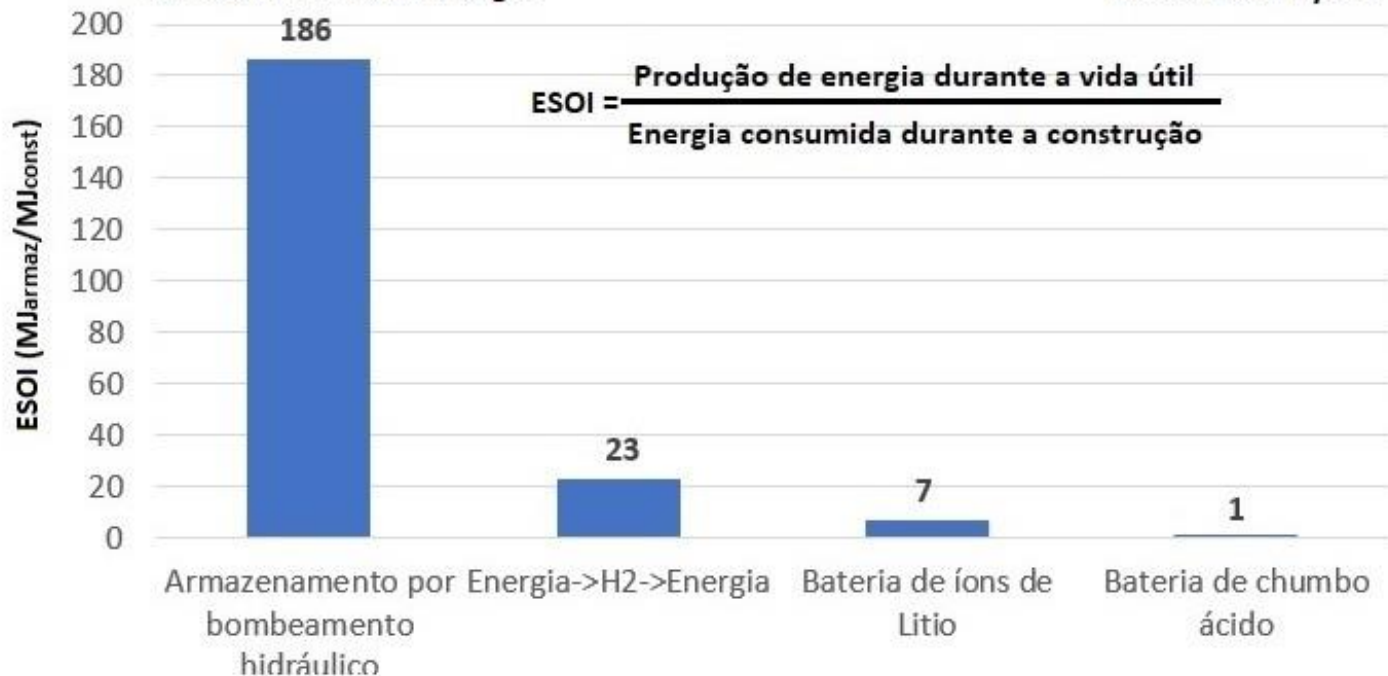


# Exemplos de Aplicação das UHRs



# Energia Armazenada X Energia Investida (ESOI) para diferentes tipos de tecnologias de armazenamento de energia

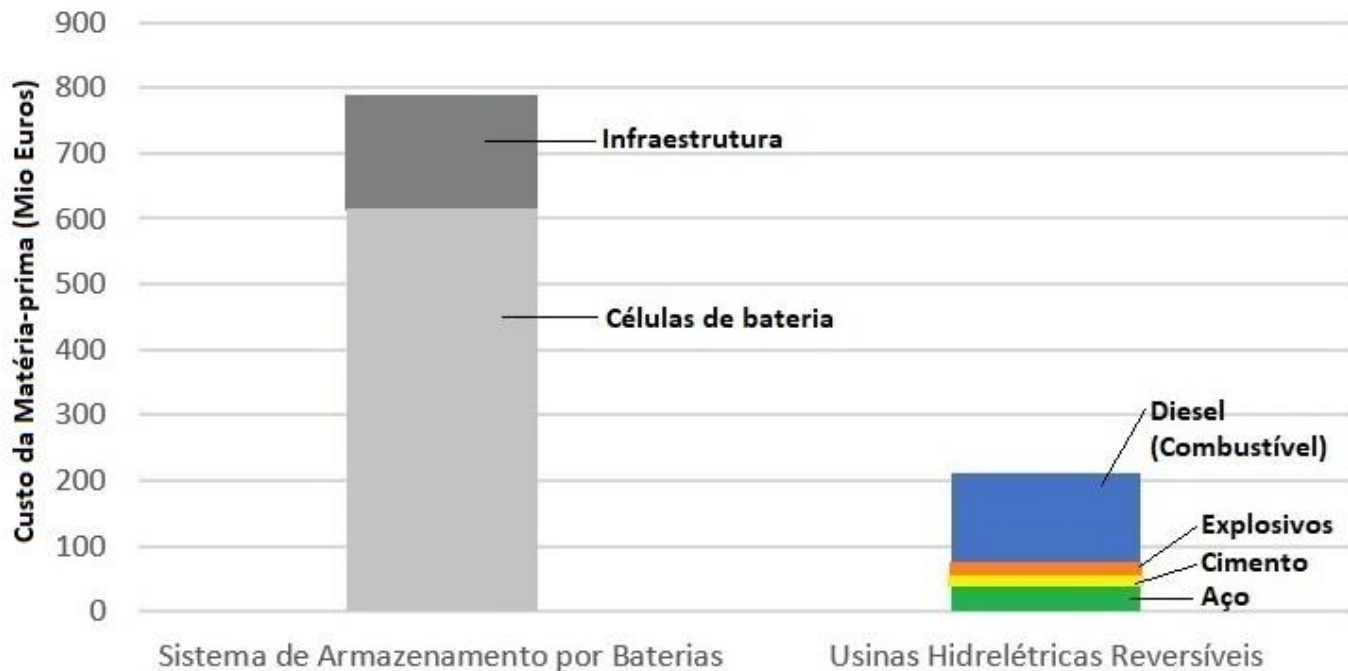
Fonte: Voith Hydro



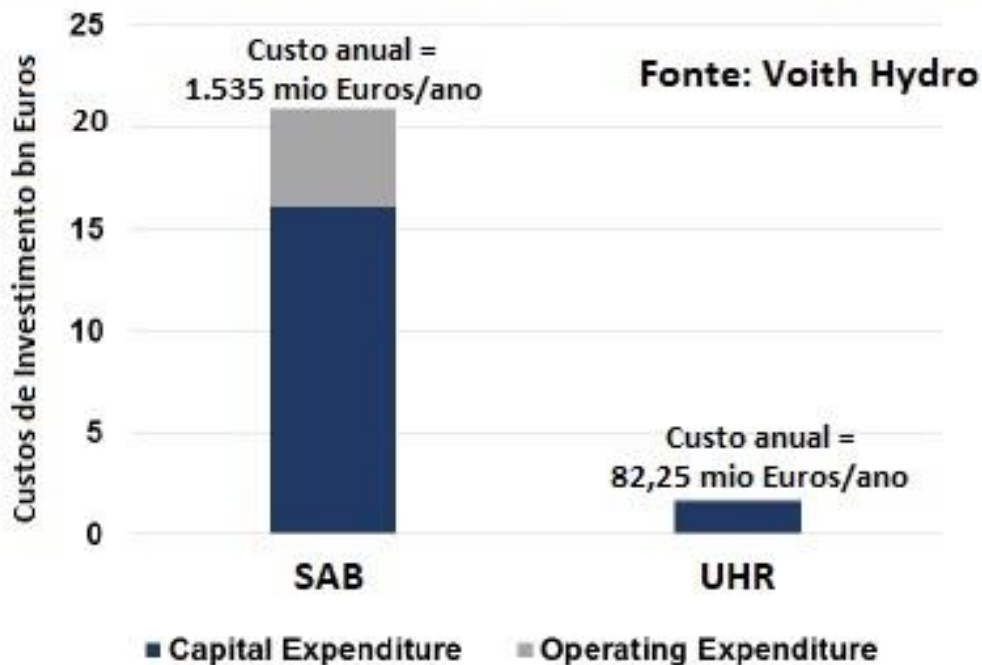
$$\text{ESOI} = \frac{\text{Produção de energia durante a vida útil}}{\text{Energia consumida durante a construção}}$$

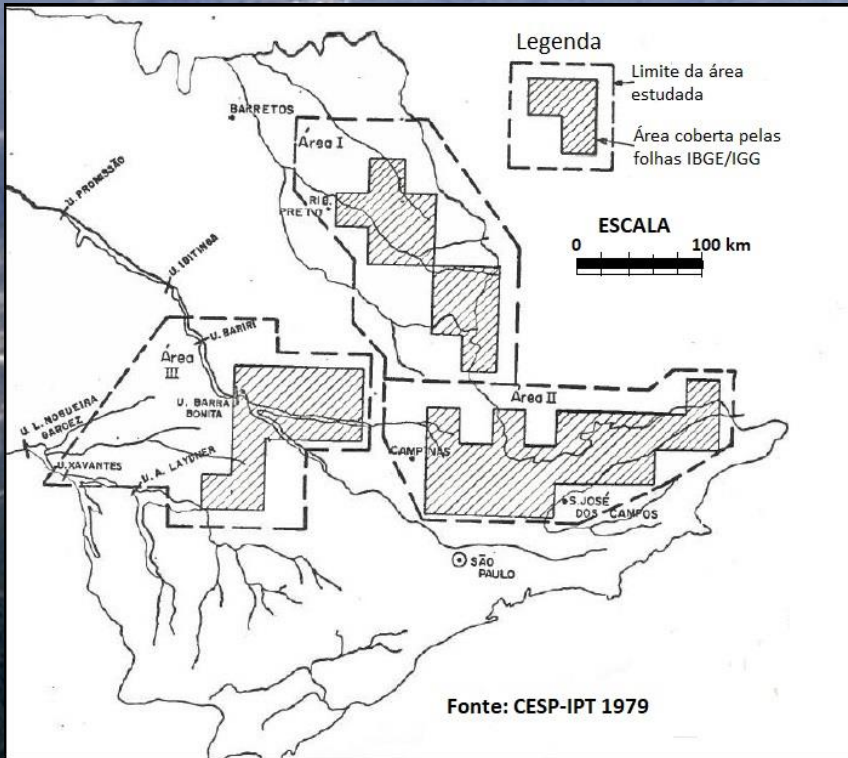


## Comparativo dos custos das matérias-primas necessárias para a instalação de uma usina de 13,4 GWh



## Comparação entre os custos de investimento CAPEX e OPEX





Fonte: CESP-IPT 1979

# Pré Inventário de pontos prováveis de instalação de UHRs

## Serras Geral e da Mantiqueira

### CESP-IPT 1979

Segundo levantamentos realizados sobre UHRs, existem no Brasil 4 UHRs abaixo mencionadas, sendo 3 no Estado de São Paulo e uma no Estado do Rio de Janeiro mas nenhuma encontra-se em funcionamento

USINAS		EQUIPAMENTO		POTÊNCIA		
NOMES	INAGURAÇÃO	Nº	FABRICANTE	TURBINA (MW)	BOMBA (MW)	QUEDA (M)
Pedreira	1939	6	Francis	78,5	42,6	25
Traição	1940	4	Kaplan	7,3	9,4	4
Vigário	1952	4	Francis	90,8	72	36
Edgar de Souza	1955	1	Francis	14,8	13,3	24

Além disso os estudos indicaram a viabilidade da implantação das

- UHR Caraguatatuba - Queda = 674m - Potência = 1.800 MW
- UHR S. Lourencinho/Juquiá - Queda = 552m - Potência = 3.780 MW

E da conversão da

- UHE Henry Borden/Cubatão - Queda 720m em UHR - Potência 4.320 MW

## UHRs - REGIÃO SUDESTE

### UHR SERRA DO CIPÓ

PI = 2.000 MW - Queda = 274 m  
Ciclo diário de 6 horas de geração

### UHR FUMAÇA

PI = 2.000 MW - Queda = 460 m  
Ciclo diário de 6 horas de geração

### UHR CARAGUATATUBA

PI = 1.800 MW - Queda = 674 m  
Ciclo diário de 3 horas de geração

### UHR JUQUIÁ

PI = 3.780 MW - Queda = 552 m  
Ciclo diário de 3 horas de geração

### UHR CACARIA

PI = 3.000 MW - Queda = 315 m  
Ciclo diário de 6 horas de geração

### UHR HENRY BORDEN - CUBATÃO


PI = 4.320 MW - Queda = 720 m  
Ciclo de 7 horas de geração



---

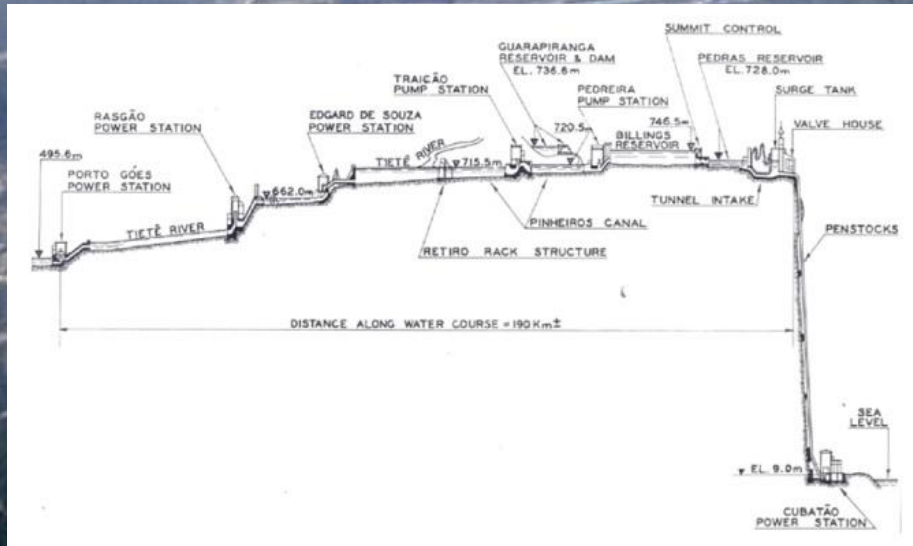
# BACIA DO ALTO TIETÊ (BAT) CONFLITOS ENTRE USOS DA ÁGUA:

## Origens, etapas relevantes e situação atual



A Usina Hidrelétrica Henry Borden está inserida no chamado "Complexo Henry Borden" do qual faz parte, além da própria Usina, os reservatórios Billings e Guarapiranga, as usinas elevatórias de Traição e Pedreira e o Canal do Rio Pinheiros.

Se os rios não correm para a Serra do Mar, por que não reverter seu curso através de estações elevatórias, formando um reservatório que permita a geração de energia? Eng. Asa White Kenney BILLINGS



Cálculo da Potência hidráulica:

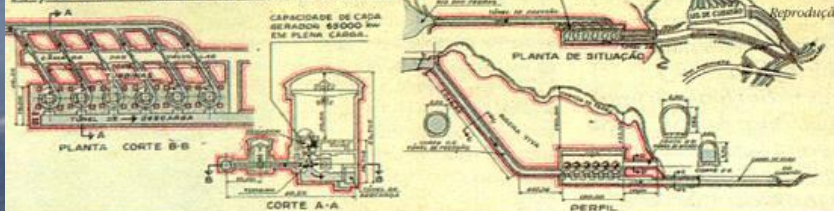
$$Ph = h * Q * g.$$

- Ph = Potência hidráulica em kW
- h = Desnível hidráulico.
- Q = Vazão disponível em m<sup>3</sup>/s.
- g = Aceleração da Gravidade

**Portanto quanto maior a queda, maior a Potência Instalada**

Pelo sistema de Billings, a energia gasta para elevar as águas do Pinheiros até a Serra do Mar é recuperada plenamente pela Usina Hidrelétrica. Os estudos mostraram que a reversão de toda a bacia do Tietê não seria factível, mas aplicar a ideia de Billings até a confluência entre os Rios Pinheiros e Tietê seria possível.

## SEÇÃO SUBTERRÂNEA DA USINA DE CUBATÃO



**Projeto UHE - Henry Borden Interna e Externa**

**INÍCIO DE OPERAÇÃO 1936**

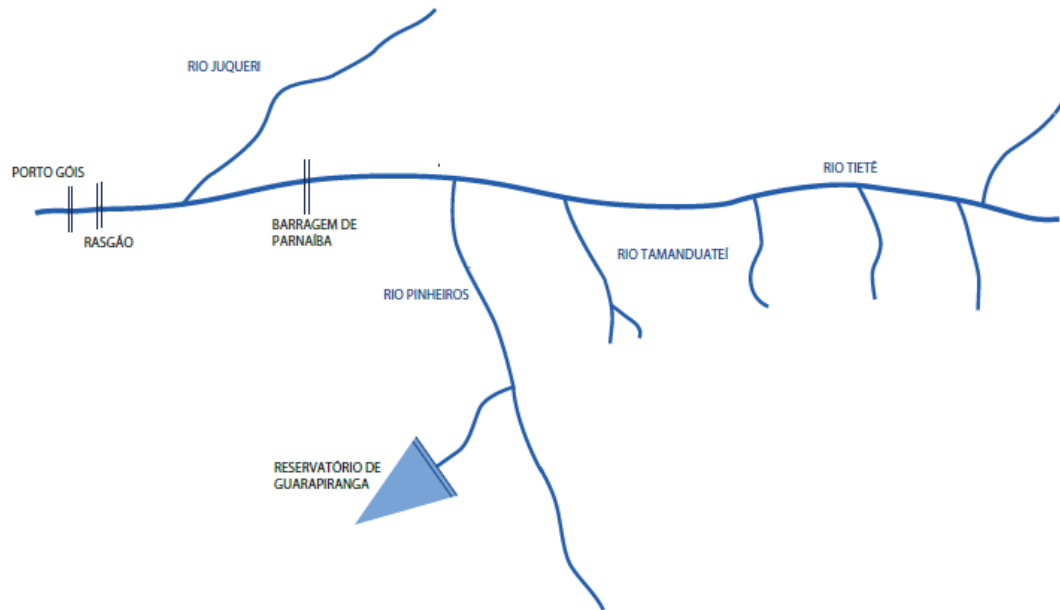


# Rio Pinheiros antes de sua canalização



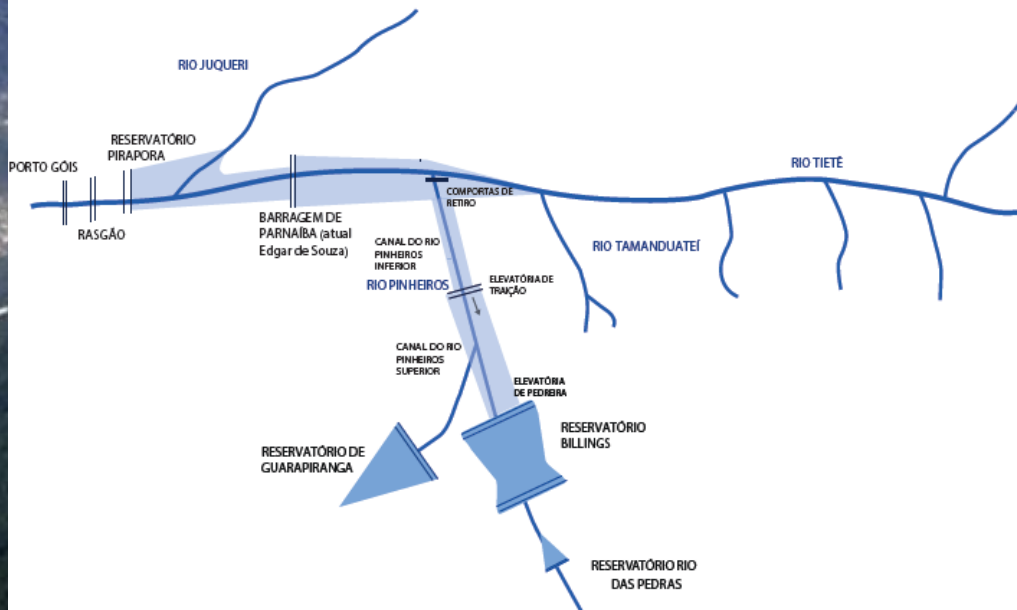
# SITUAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO HIDRELÉTRICA DO ALTO TIETÊ - CUBATÃO

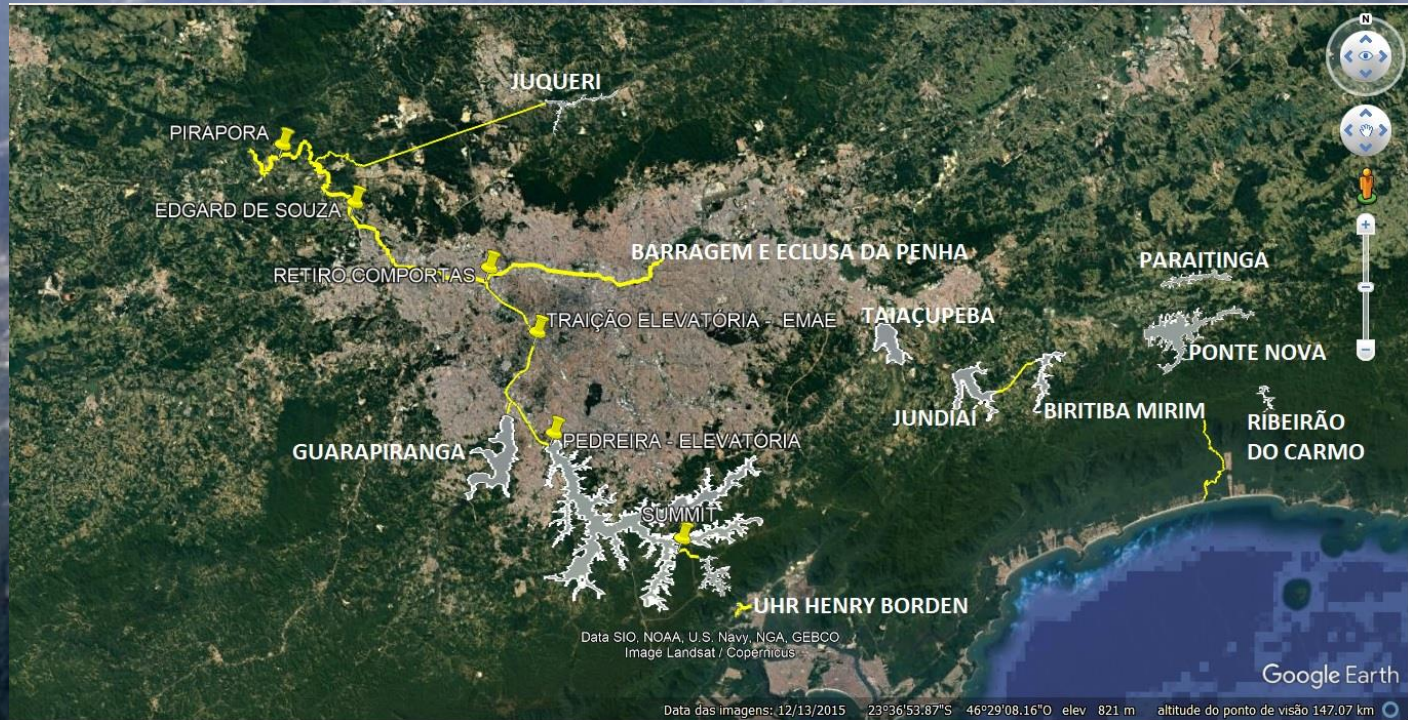
## Situação de 1910 - 1924



# SITUAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO HIDRELÉTRICA DO ALTO TIETÊ - CUBATÃO

## Situação de 1955 - 1965





JUQUERI

PIRAPORA

EDGARD DE SOUZA

RETIRO COMPORTAS

BARRAGEM E ECLUSA DA PENHA

PARAITINGA

TRAIÇÃO ELEVATÓRIA - EMAE

TATUAPÉ

PONTE NOVA

GUARAPIRANGA

PEDREIRA - ELEVATÓRIA

JUNDIAÍ

BIRITIBA MIRIM

RIBEIRÃO DO CARMO

SUMMIT

UHR HENRY BORDEN

Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO  
Image Landsat / Copernicus

Google Earth

Data das imagens: 12/13/2015 23°36'53:87\"S 46°29'08.16\"O elev 821 m altitude do ponto de visão 147.07 km



A diferença entre as quedas líquidas máximas da UHE Henry Borden e a cascatas de usinas da Bacia Tietê - Paraná é de 370 metros



Para que se tenha uma idéia da eficiência da UHE Henry Borden, preparamos uma comparação entre as usinas UHR Henry Borden, UHE Santo Antônio (Rio Madeira - Rondônia) e a cascata de UHE na Bacia dos Rios Tietê e Paraná

	<b>UHE Henry Borden</b>	<b>UHE Santo Antônio</b>	<b>Cascata Bacia Tietê/Paraná</b>
Queda (m)	760	9	350
Reservatório (km <sup>2</sup> )	42	422	4.500
Relação Potência Instalada X Área do reservatório	21	8,5	9,11
Potência Instalada (MW)	880	3.600	41.000
Energia gerada anualmente (MW/h)(*)	32.000	270	20.000
Distância do centro de consumo (km)	<100	2.500	900

(\*) A energia gerada anualmente corresponde a uma vazão de 1m<sup>3</sup>/s

## Restrição de operação da Usina Hidrelétrica Henry Borden

Desde outubro de 1992, a operação desse sistema vem atendendo às condições estabelecidas na Resolução Conjunta SMA/SES 03/92, de 04/10/92, atualizada pela Resolução SMA-SSE-02, de 19/02/2010, que só permite o bombeamento das águas do Rio Pinheiros para o Reservatório Billings para controle de cheias, reduzindo em 75% aproximadamente a energia produzida em Henry Borden





“Propostas para integrar geração hidrelétrica e abastecimento de água na Bacia do Alto Tietê”

**Projeto UHR - Henry Borden: transformação das Usinas Hidrelétricas em Cubatão em Usinas Reversíveis**



# Circuito fechado

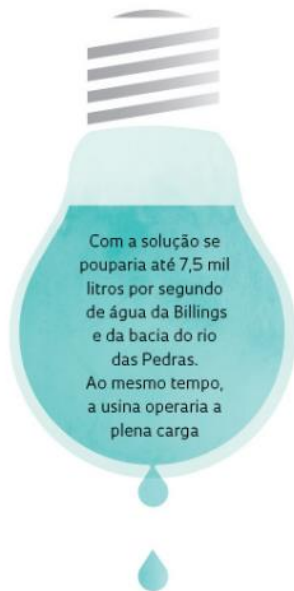
Proposta para tornar reversível a Henry Borden, em operação na Baixada Santista desde 1929

FONTE SADALLA DOMINGOS/USP

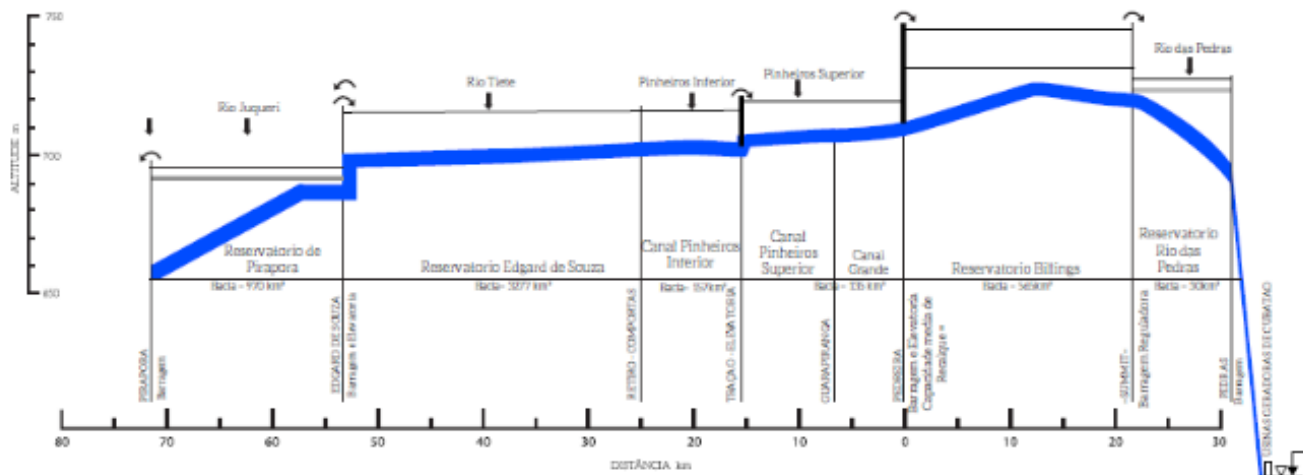


Atualmente, um conjunto de tubulações internas e externas leva água do sistema Billings e da bacia do rio das Pedras para o complexo hidrelétrico Henry Borden. Pelo projeto, será construído um reservatório para armazenar a água retirada da Billings

Durante a noite, fora do horário de pico do consumo de energia, a Henry Borden pararia de operar e a água seria bombeada de volta para o alto da serra para ser reutilizada

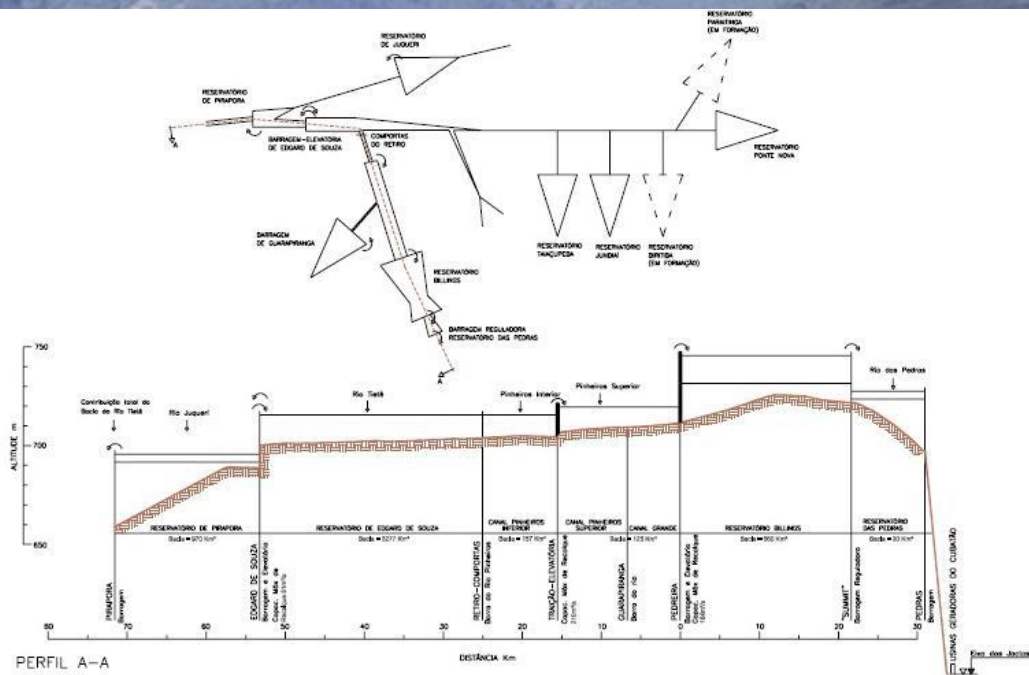


Com a solução se pouparia até 7,5 mil litros por segundo de água da Billings e da bacia do rio das Pedras. Ao mesmo tempo, a usina operaria a plena carga



PERFIL A-A

SITUAÇÃO FINAL DO APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO DO ALTO TIETÊ - CUBATÃO

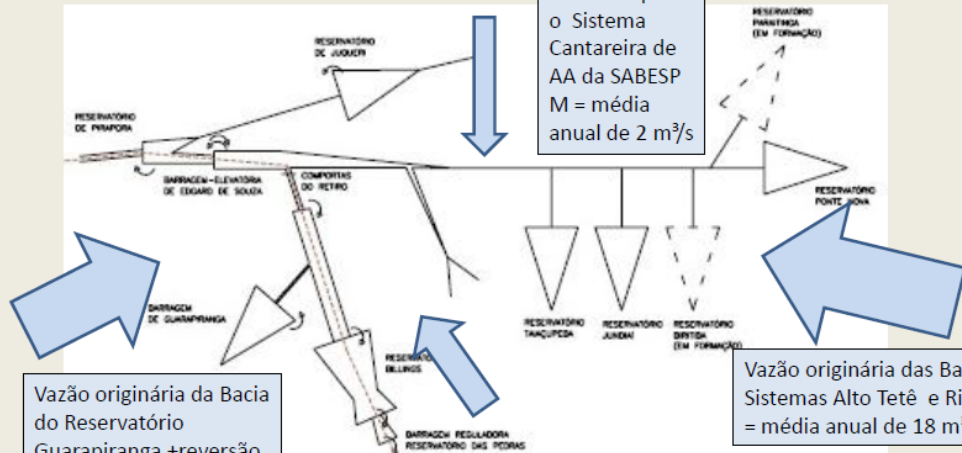


DESENHO 8

SITUAÇÃO FINAL DO APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO DO ALTO TIETÊ - CUBATÃO  
(Esquema em Planta e Perfil)

## VAZÕES DE AA PARA RMSP ORIGINÁRIAS DA BAT

Vazão  
originária da  
Bacia do Rio  
Juqueri  
revertida para  
o Sistema  
Cantareira de  
AA da SABESP  
M = média  
anual de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$



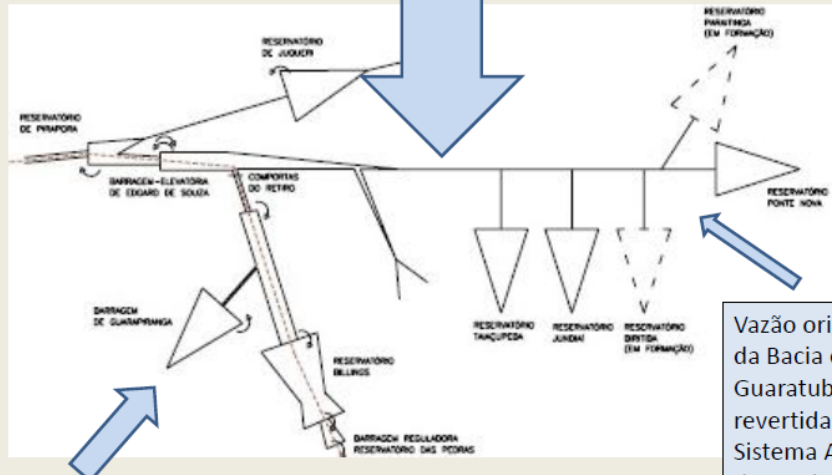
Vazão originária da Bacia do Reservatório Guarapiranga + reversão do Braço do Taçupeba da Bacia do Billings = média anual de  $13 \text{ m}^3/\text{s}$

Vazão originária do Braço do Rio Grande da Bacia do Billings = média anual de  $4 \text{ m}^3/\text{s}$

Vazão originária das Bacias dos Sistemas Alto Tetê e Rio Claro = média anual de  $18 \text{ m}^3/\text{s}$

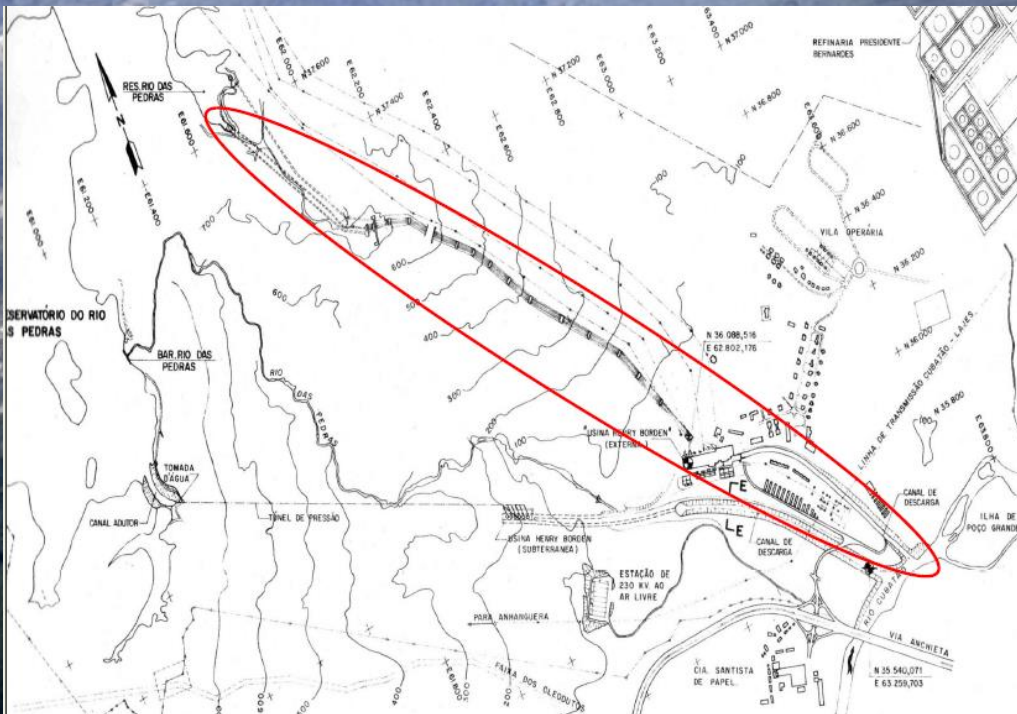
## VAZÕES DE AA PARA RMSP ORIGINÁRIAS DE BACIAS VIZINHAS DA BAT

Vazão originária da Bacia do Piracicaba revertida para o Sistema Cantareira de AA da SABESP M = média anual de 31 m<sup>3</sup>/s

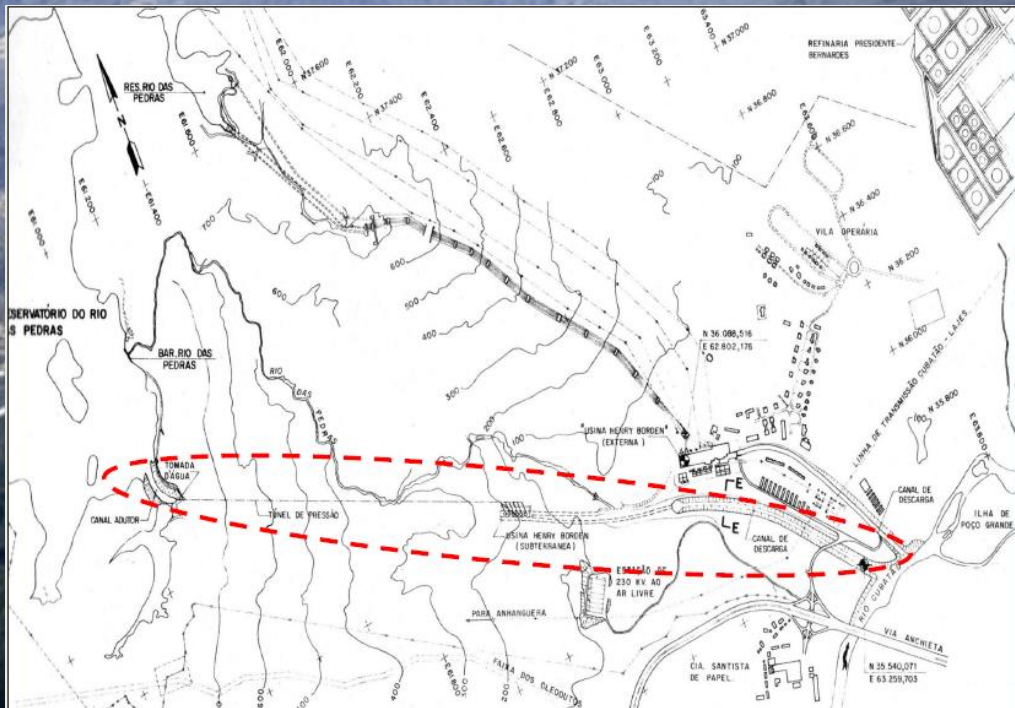


Vazão originária da Bacia do Capivari-Monos revertida para o Reservatório Guarapiranga e Sistema de AA da SABESP-M = média anual de 1 m<sup>3</sup>/s

Vazão originária da Bacia do Guaratuba e revertida para o Sistema Alto Tetê de AA da SABESP-M = média anual de 0,5 m<sup>3</sup>/s

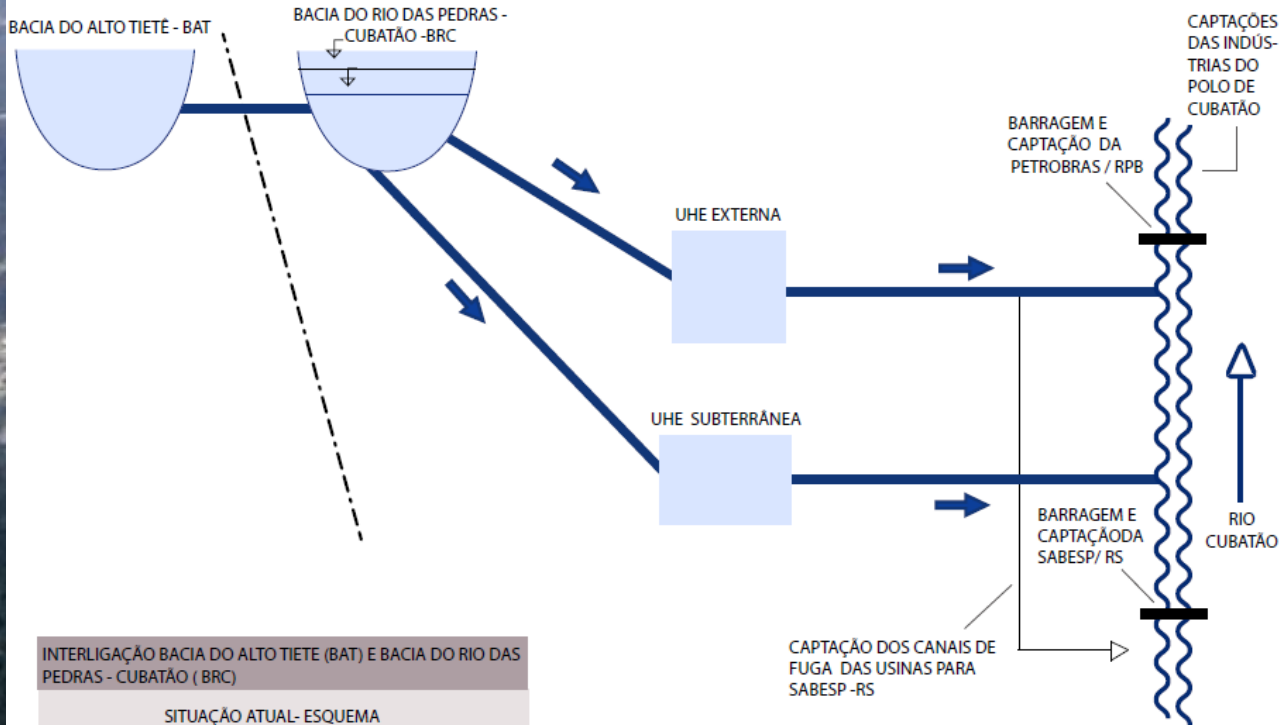


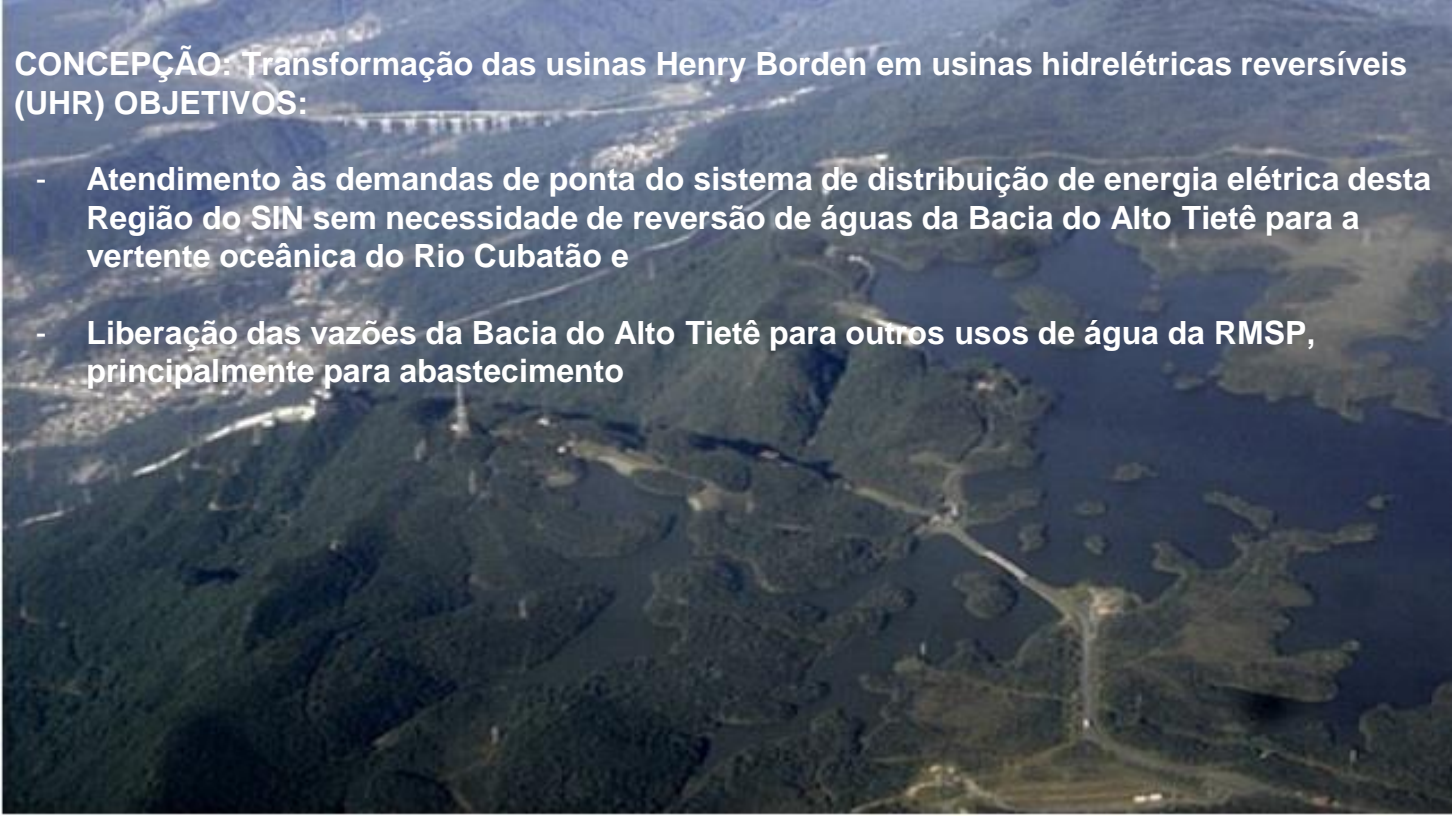
Situação atual em planta - UHE Henry Borden Externa - 469 MW



Situação atual em planta: UHE Henry Borden Subterrânea (420 MW)

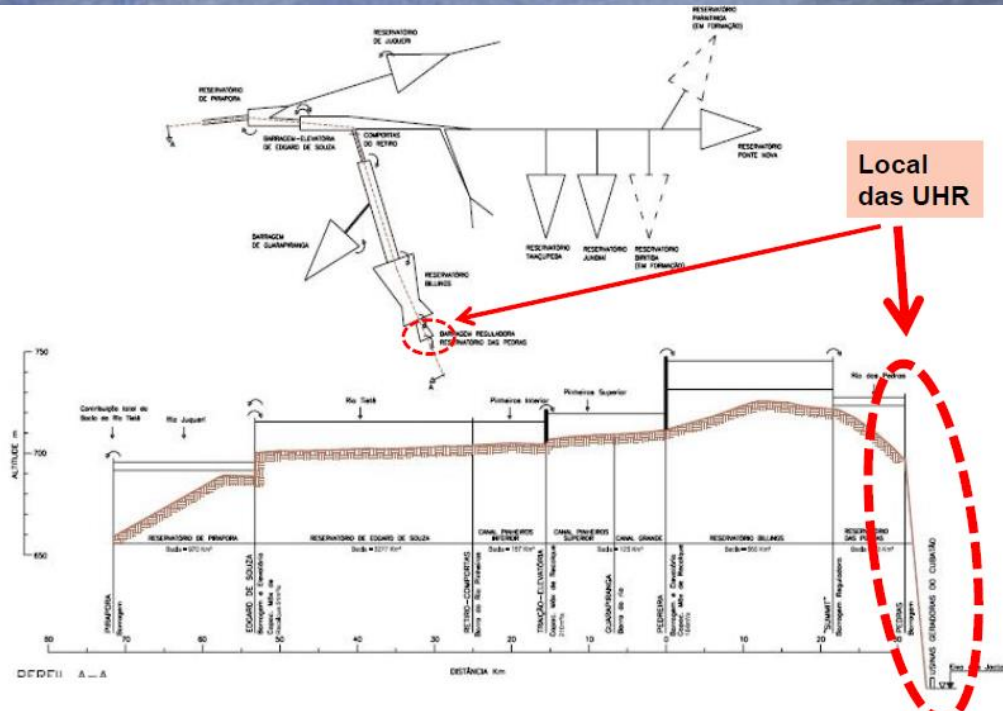




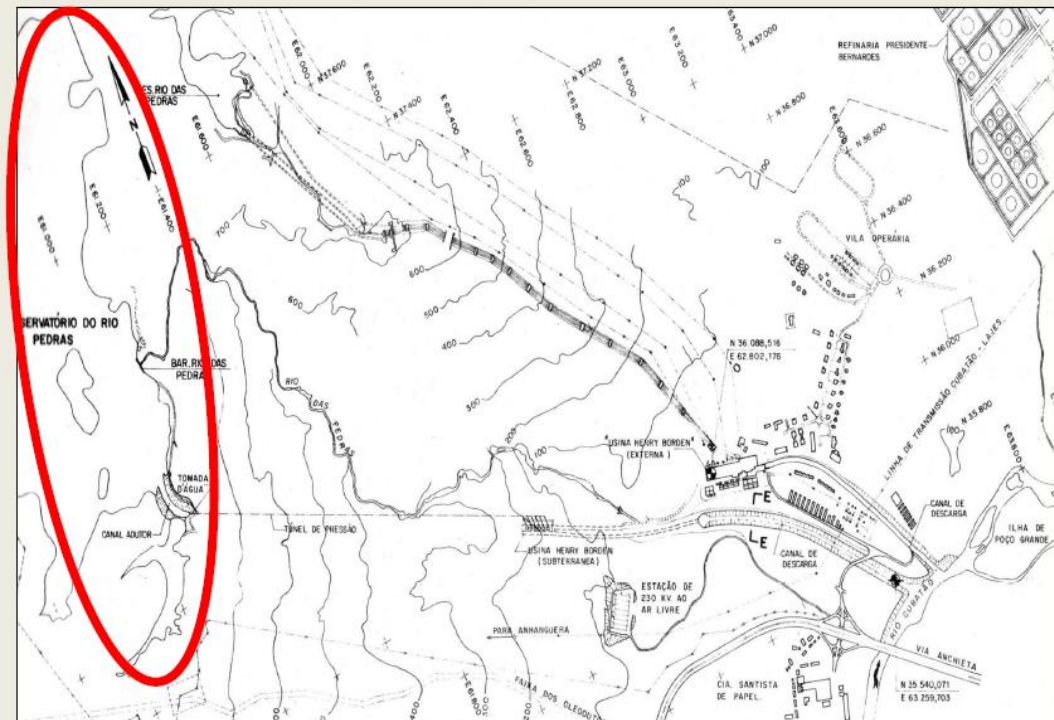
An aerial photograph of a large reservoir, likely the Alto Tietê Basin, with a dam visible in the upper left. The water is dark blue, and the surrounding land is green with some cleared areas.

**CONCEPÇÃO: Transformação das usinas Henry Borden em usinas hidrelétricas reversíveis (UHR) OBJETIVOS:**

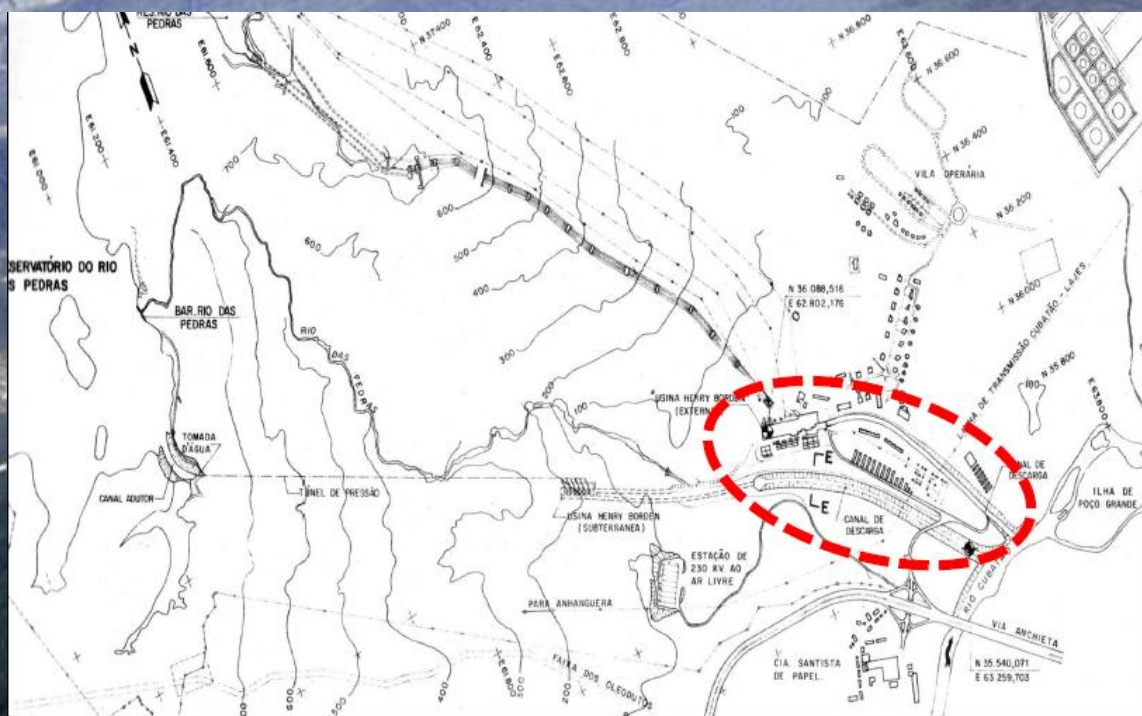
- **Atendimento às demandas de ponta do sistema de distribuição de energia elétrica desta Região do SIN sem necessidade de reversão de águas da Bacia do Alto Tietê para a vertente oceânica do Rio Cubatão e**
- **Liberação das vazões da Bacia do Alto Tietê para outros usos de água da RMSP, principalmente para abastecimento**



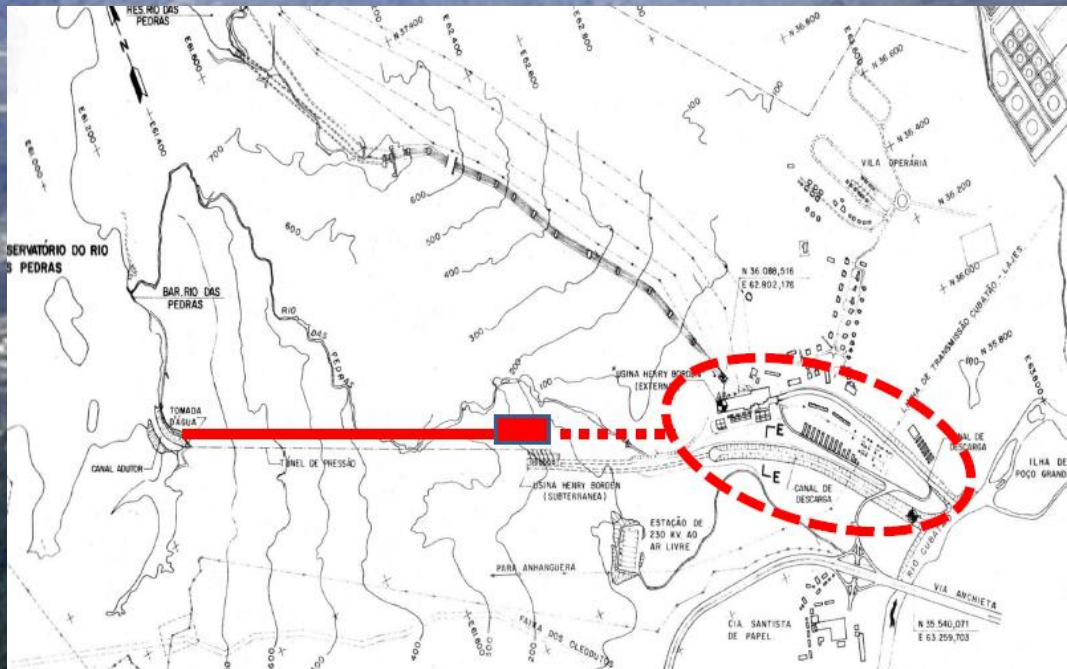
Esquemas em planta e perfil da situação atual do Sistema de Geração Hidrelétrica das Bacias do Alto Tietê e Rio das Pedras-Cubatão



**LOCAL DAS UHR: reservatório superior existente = Reservatório Rio das Pedras**

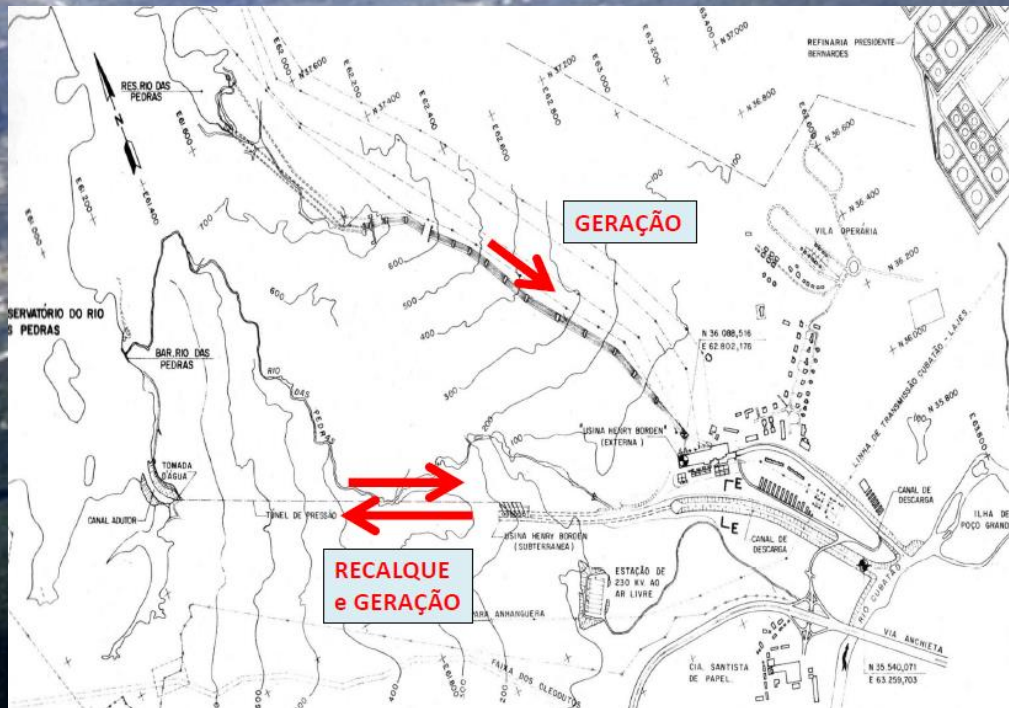


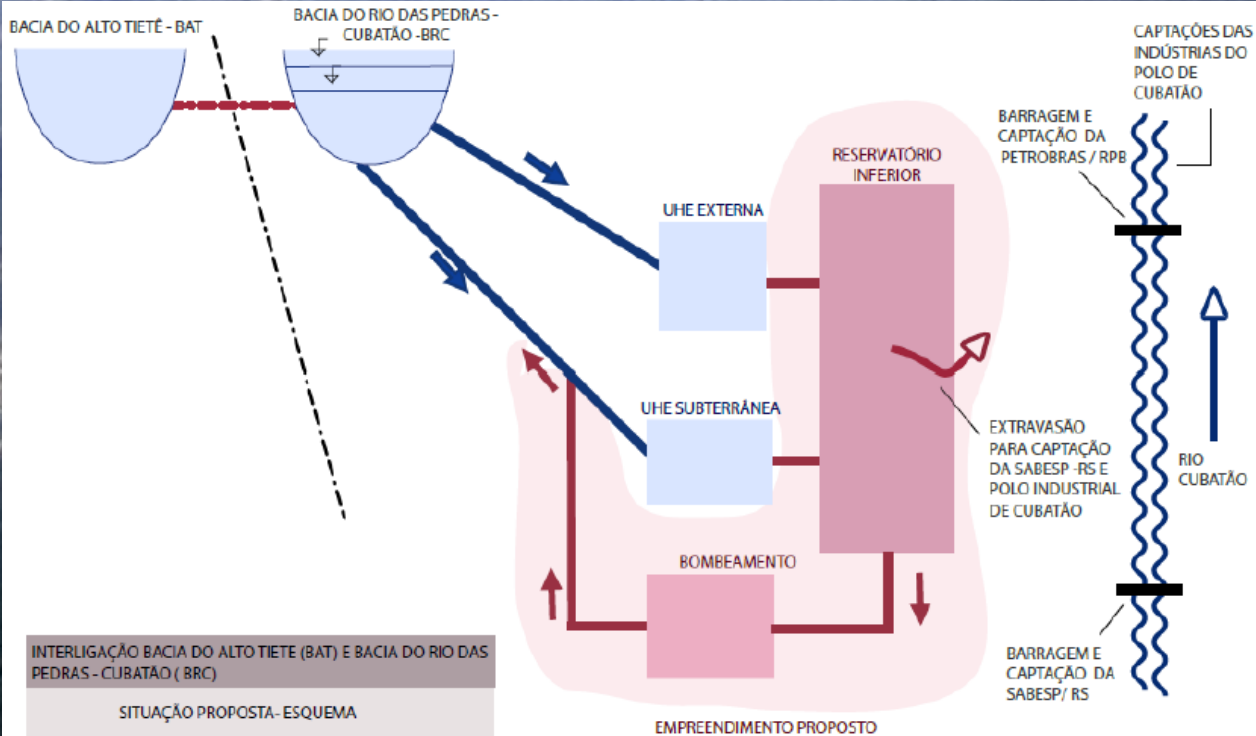
**Local das UHR: reservatório inferior a ser implantado unificando área entre os canais de descarga das usinas externa e subterrânea**



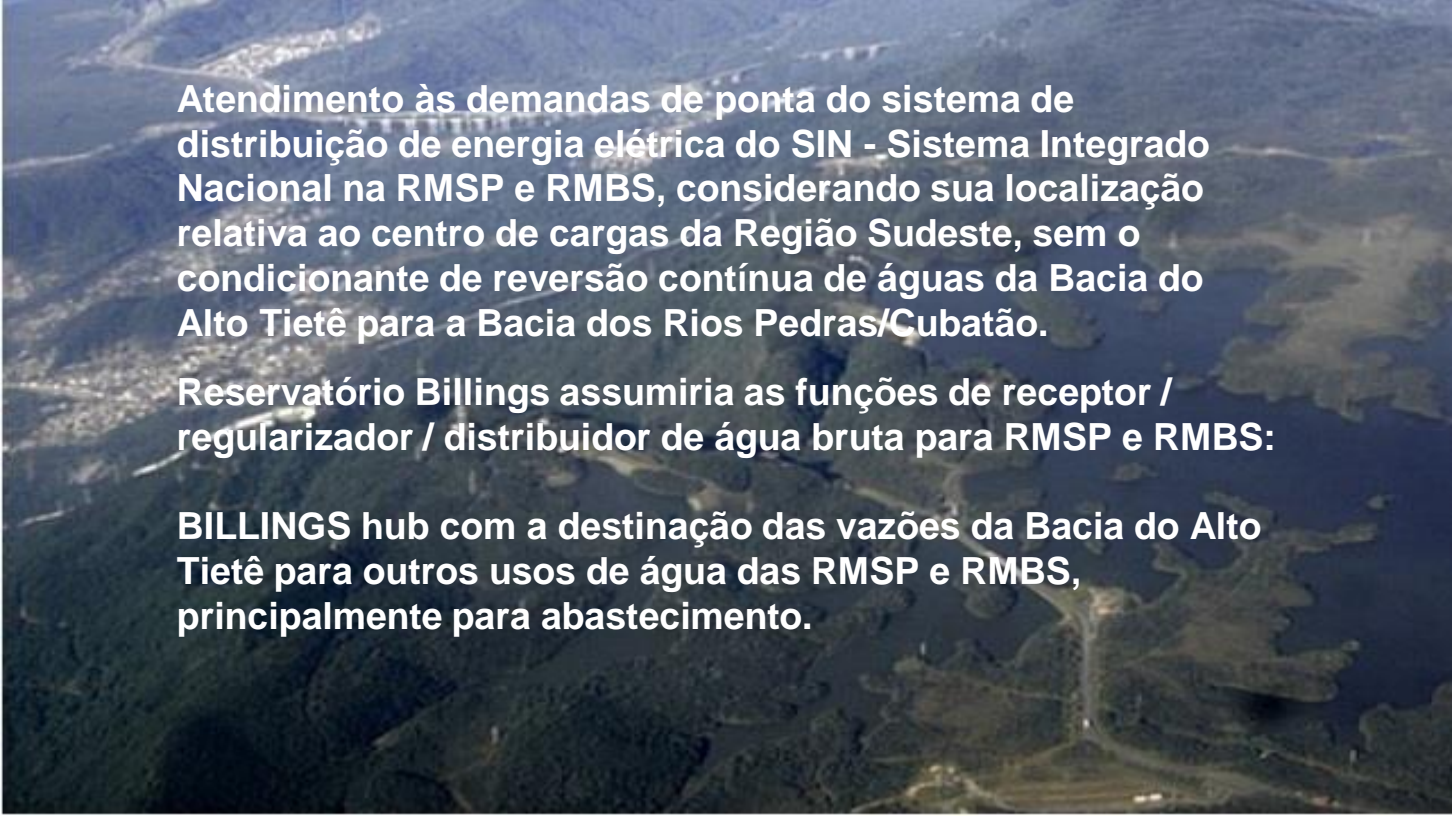
**Local das UHR: estação de bombeamento e túnel de sucção a serem implantados utilizando o túnel existente da usina subterrânea para recalque.**

# UHRs: Usinas Henry Borden externa para geração e subterrânea para geração e recalque







An aerial photograph of a river basin, showing a large reservoir (Billings) and a dam structure. The surrounding landscape is a mix of green vegetation and brownish terrain, likely due to deforestation or agricultural activity. The text is overlaid on the image in white, bold font.

**Atendimento às demandas de ponta do sistema de distribuição de energia elétrica do SIN - Sistema Integrado Nacional na RMSP e RMBS, considerando sua localização relativa ao centro de cargas da Região Sudeste, sem o condicionante de reversão contínua de águas da Bacia do Alto Tietê para a Bacia dos Rios Pedras/Cubatão.**

**Reservatório Billings assumiria as funções de receptor / regularizador / distribuidor de água bruta para RMSP e RMBS:**

**BILLINGS hub com a destinação das vazões da Bacia do Alto Tietê para outros usos de água das RMSP e RMBS, principalmente para abastecimento.**



## RESERVATÓRIO BILLINGS, dados relevantes de suas magnitude, funções e relevância:

- Vazão disponível regularizada =  $18 \text{ m}^3/\text{s}$  e curvas cota-área-volume: volume de  $1.300 \text{ hm}^3$ .
- Corpo receptor, via Canal do Rio Pinheiros e Elevatórias de Traição e Pedreira, dos esgotos da RMSP/BAT nos períodos:
  - 1954 ~ 1975 : receptor de praticamente a totalidade dos esgotos da BAT.
  - 1975 ~ 1985 : vigência da operação energética e sanitária para melhoria das suas condições sanitárias, com esgotos bombeados parcialmente
  - 1985 ~ 1992 : intermitência do bombeamento sem regras claras
- A partir de 1992 : vigência de regra operacional da Constituição Estadual, com bombeamento permitido apenas para controle de enchentes.

# ESTIMATIVA DE ACRÉSCIMO DAS VAZÕES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM AS NOVAS FUNÇÕES PREVISTAS DO BILLINGS

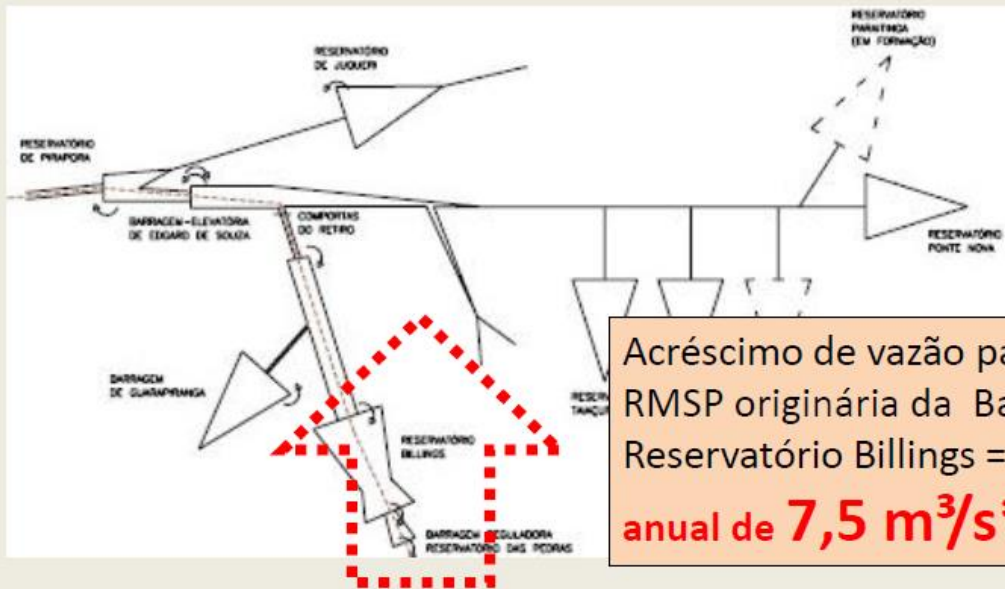
## Em relação à situação atual

( + ) Vazão média total Billings	18,0m <sup>3</sup> /s
( - ) Vazão utilizada atualmente para RMSP em Rio Grande e Taquacetuba	7,2m <sup>3</sup> /s
( - ) Vazão utilizada atualmente RMBS na ETA Cubatão	3,8m <sup>3</sup> /s
( - ) Água industrial Cubatão	4,0m <sup>3</sup> /s
( + ) Vazão média Rio das Pedras	2,5m <sup>3</sup> /s
( + ) Vazão média Rio Cubatão	2,0m <sup>3</sup> /s

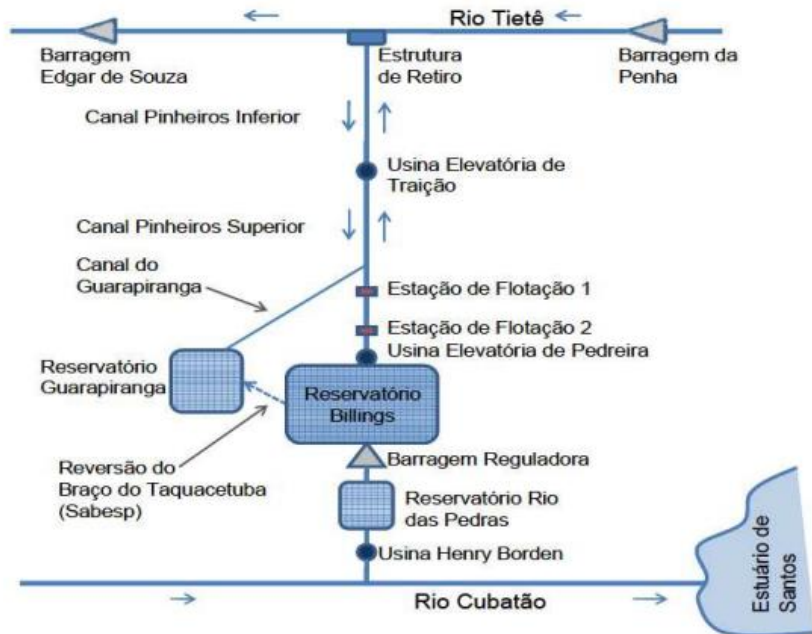
**Acréscimo de vazão para AA da RMSP originária da Bacia do Reservatório Billings**

**7,5 m<sup>3</sup>/s**

# ESTIMATIVA DE ACRÉSCIMO DAS VAZÕES DE AA PARA RMSP ORIGINÁRIAS DA BAT (em relação à situação atual)



Acréscimo de vazão para AA da RMSP originária da Bacia do Reservatório Billings = **média anual de 7,5 m<sup>3</sup>/s\***



## ESTIMATIVA DE ACRÉSCIMO DAS VAZÕES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM AS NOVAS FUNÇÕES PREVISTAS DO BILLINGS

Em relação à situação futura com vazões de reuso em destaque

( + ) Vazão média total Billings	18,0m <sup>3</sup> /s
( - ) Vazão utilizada atualmente para RMSP em Rio Grande e Taquacetuba	8,2m <sup>3</sup> /s
( + ) Vazão bombeada ao Billings após tratamento terciário (zero)	3,0m <sup>3</sup> /s
( - ) Vazão utilizada atualmente RMBS na ETA Cubatão	4,3m <sup>3</sup> /s
( - ) Água industrial Cubatão	4,0m <sup>3</sup> /s
( + ) Vazão reuso na RMBS	2,0m <sup>3</sup> /s
( + ) Vazão média Rio das Pedras	2,5m <sup>3</sup> /s
( + ) Vazão média Rio Cubatão	2,0m <sup>3</sup> /s

**Acréscimo de vazão para AA da RMSP originária da  
Bacia do Reservatório Billings**

**11,5 m<sup>3</sup>/s**



**Proposta de dois projetos estruturais para**

- Bacia do Alto Tietê/RMSP e**
- Bacia Pedras-Cubatão/RMBS**



## **Projetos Estruturais:**

- **Usina Reversível em Cubatão/Henry Borden: UHR-HB.**
- **Reservatório Billings com as funções de receptor/regularizador/distribuidor de água bruta para RMSP e RMBS: BILLINGS hub**





**Estudos de Viabilidade Técnico, Econômico-Financeiro e Ambiental – EVTEFA dos dois projetos estruturais.**

**Atividades (comuns aos dois projetos)**

- 1. Sistemas existentes - dados cadastrais / operacionais**
- 2. Avaliações de desempenho-situação atual**
- 3. Deseconomias /custos de oportunidade**
- 4. Avaliações de desempenho-situação proposta**
- 5. Avaliação de benefícios**
- 6. Custos de implantação**



**Muito obrigado!**

**Antonio Lambertini**

[antonio.lambertini@gmail.com](mailto:antonio.lambertini@gmail.com)

**11-9-8843-8845**

[www.linkedin.com/in/antoniolambertini](http://www.linkedin.com/in/antoniolambertini)

Para mais informações  
entre em contato conosco!

