



Associação Brasileira de Armazenamento  
e Qualidade de Energia

# As Usinas Reversíveis e a Conjuntura Brasileira

## Uma Abordagem Geral

*José Augusto Pimentel Pessoa*  
*Diretor Técnico da ABAQUE*

Novembro/2015

# Histórico

- Nas décadas de 60 e 70 o Brasil passou por um período de grande expansão do seu parque gerador caracterizada pela construção de usinas hidrelétricas com grandes reservatórios e boa capacidade de regularização (reservatórios plurianuais).
- Nesse período as Usinas Reversíveis foram colocadas em segundo plano favorecendo-se então as grandes usinas hidroelétricas.
- Em 15/10/2015, os empreendimentos em operação totalizavam cerca de 138,8 GW de Potencia Fiscalizada em todos os tipos de energia.
- Encontram-se em construção 22,5 GW (pot. Outorgada) sendo os empreendimentos com construção não iniciada 19,0 GW.
- Devido a questões ambientais o modelo de grandes usinas hidrelétricas com reservatórios está sendo substituído por usinas a “fio d’água”, sem qualquer reservação, crescentemente complementado pela geração termoelétrica e fontes renováveis..
- Na matriz atual ( Out./2015) as usinas térmicas já atingem 28,6% do total, as hidráulicas 65,17% –UHE+PCH+CGH, eólicas / fotovoltaicas 4,81%, nucleares 1,42%, evidenciando o modelo hidrotérmico.

# Usinas Reversíveis Construídas no Brasil

Usina	Ano de Inauguração	Estado
Pedreira	1939	SP
Traição	1940	SP
Vigário	1952	RJ
Edgar de Souza	1955	SP

# Usinas Reversíveis no Mundo

Existem atualmente no mundo cerca de 270 usinas reversíveis, já operando ou em construção, representando uma capacidade instalada total de 140.000 MW. (Fonte. I.E.A- International Energy Association - 2014).

# Usinas Reversíveis no Mundo

Station	Country	Capacity (MW)
<u>Bath County Pumped Storage Station</u>	<u>USA</u>	3,003
<u>Guangdong Pumped Storage Power Station</u>	<u>China</u>	2,400
<u>Huizhou Pumped Storage Power Station</u>	<u>China</u>	2,400
<u>Okutataragi Pumped Storage Power Station</u>	<u>Japan</u>	1,932
<u>Ludington Pumped Storage Power Plant</u>	<u>USA</u>	1,872

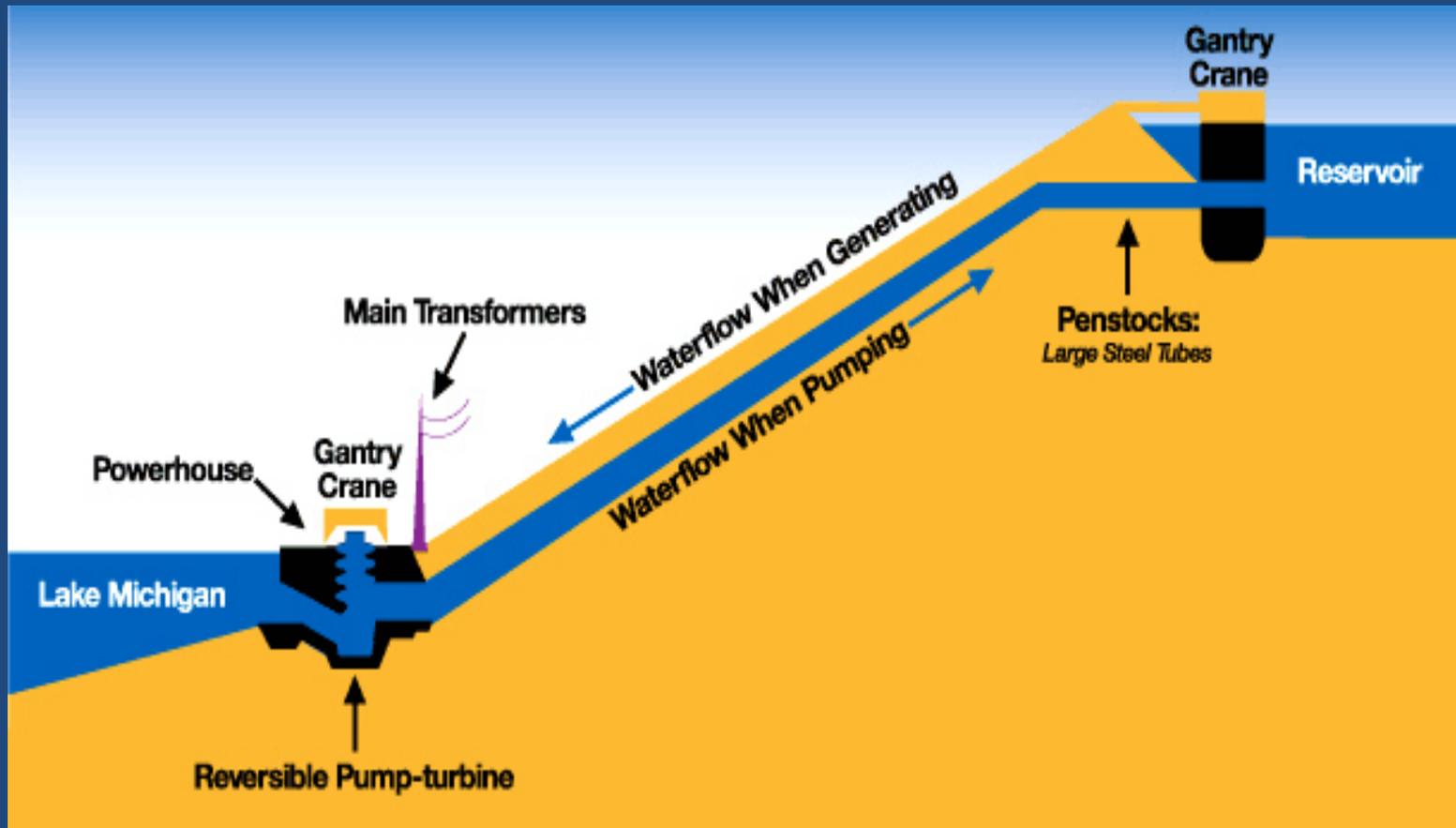
# Características das Usinas Reversíveis

As Usinas Hidroelétricas Reversíveis seriam importante auxílio para a confiabilidade do sistema, a saber:

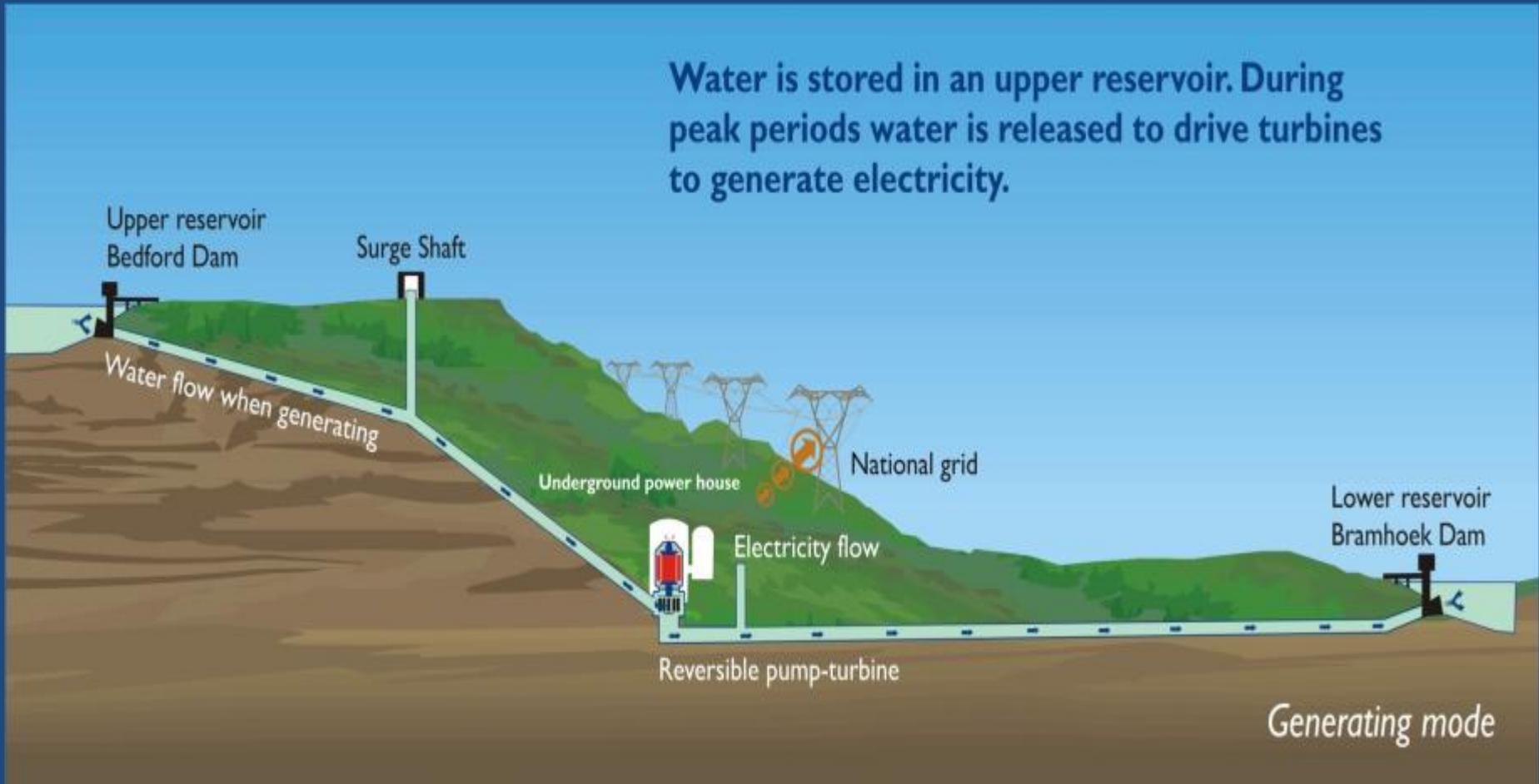
- conferem estabilidade às fontes intermitentes e variáveis das energias renováveis;
- Auxiliam os serviços ancilares;
- Provêm suprimento de carga nos momentos de pico;
- São muito rápidas para passar do modo “bomba” para modo “turbina” (cerca de 2 minutos até geração max.). Uma turbina a gás necessitaria 7 a 15 min. para aquecer uniformemente.

Fonte: Usinas hidroelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas – Fausto A. Canales; Alexandre Beluco; Carlos A. B. Mendes-IPH- RS

# Esquema Geral de uma Usina Reversível de Superfície – Usina Ludington – 6 x 312MW=1872 MW –H= 111m- USA



# Esquema geral de uma Usina Reversível Subterrânea – Usina Ingula – $4 \times 333 \text{ MW} = 1332 \text{ MW}$ – $H = 470 \text{ m}$ – Africa do Sul



# Tipos de Usinas Reversíveis

- Circuito Fechado (Closed Loop)
  - Utiliza dois reservatórios sendo que nenhum destes está conectado a um rio, podendo ser artificiais ou lagos existentes e adaptados;
  - Necessita pequena adição de água para reposição de perdas por evaporação;
  - Menores impactos ambientais, não há transferência a partir de cursos de água após enchimento do reservatório.
- Circuito Aberto (Open Loop)
  - Utiliza dois reservatórios, sendo pelo menos um, constituído a partir de afluências naturais de água;
  - O tipo mais comum é a combinação de bombeamento para armazenamento de água com uma hidroelétrica convencional.
- Circuito Semiaberto (Variante do anterior )
  - Utiliza dois reservatórios sendo um deles artificial e o outro constituído a partir de afluências naturais de água ou mesmo de um rio.

# Circuito Fechado ( Closed Loop)

Usina Ludington – 1872 MW- H=111m – USA -



PHOTO: LUDINGTON PUMPED STORAGE PROJECT  
COURTESY: CONSUMERS ENERGY COMPANY

# Circuito Semiaberto

Usina Hohenwarte II – 8 x 40MW = 320MW - H=304m – Rio Saale - Alemanha



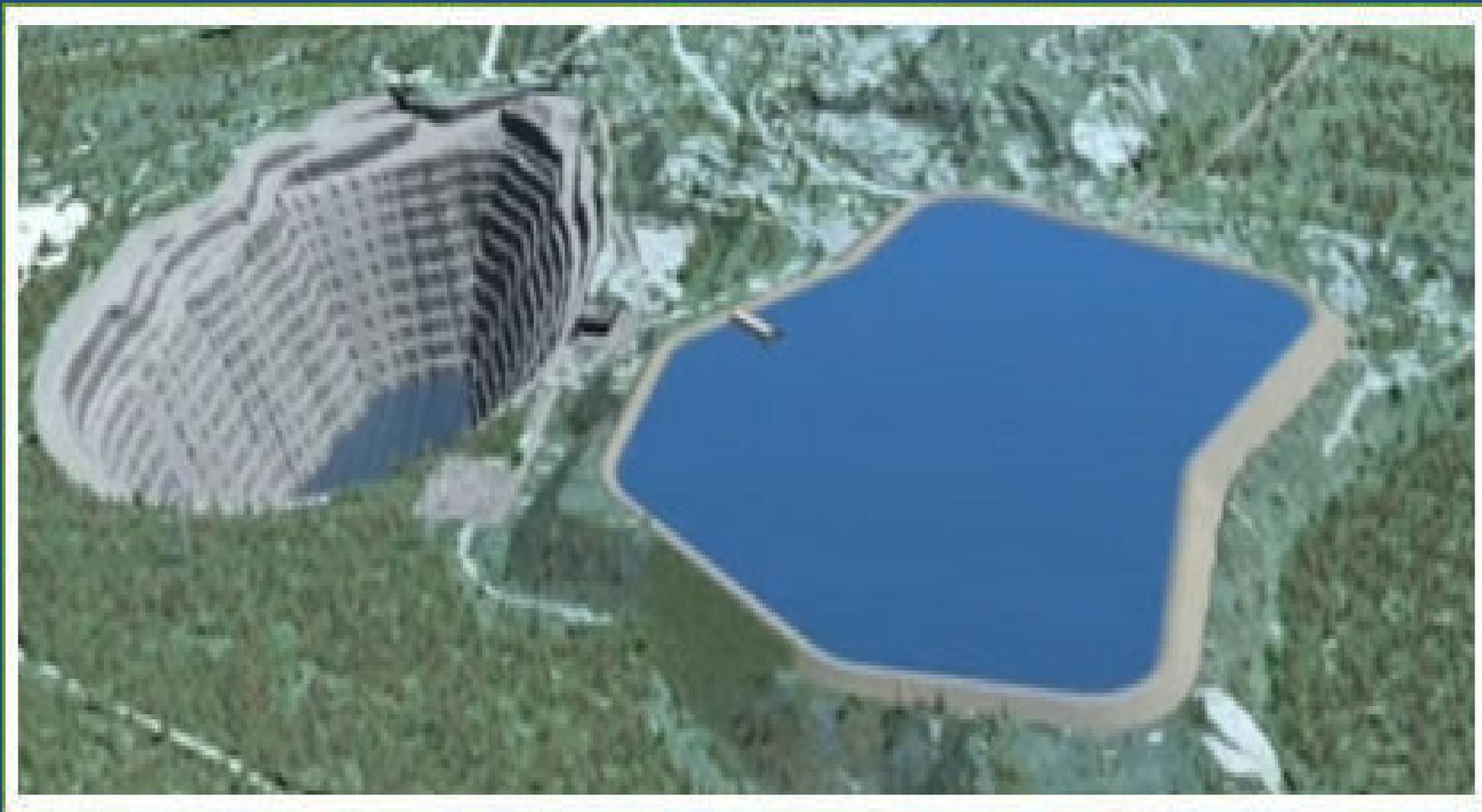
# Circuito Aberto

Usina Le Cheylas – 2 x 240 MW= 480 MW- H=261m - França



# Usina Marmora - 400 MW – Canadá

## Circuito aberto – Em construção



# Circuito Marinho

**Circuito Marinho** - Utiliza a superfície do mar como reservatório inferior, permitindo instalações maiores, mais econômicas, sem utilizar “água doce”, com mais de 15 anos de acompanhamento em tratamento da corrosão e aderência de materiais marinhos.

Usina de Okinawa -31,4 Mw- H=136m- – Japão



# Principais Vantagens das usinas Reversíveis

- I- São viáveis técnica e economicamente como fontes disponíveis para o armazenamento de energia, não requerendo combustíveis fósseis para geração;
- II- Constituem uma fonte de energia renovável sem emissão de gases de efeito estufa;
- III- São aptas para transferir carga durante as demandas de pico sem requerer tempo de preparação para operação;
- IV- São usualmente denominadas fontes “black start”, pois são aptas a restaurar rapidamente as interconexões do sistema elétrico quando ocorre um “blackout”.

# Fornecimento de Serviços Ancilares

As Usinas Reversíveis tem ainda a capacidade de fornecer Serviços Ancilares para o Sistema Elétrico:

- Controle de frequência, necessário para controlar as variações de frequência durante a operação do sistema;
- Reserva de potência, necessária para restabelecer o equilíbrio entre carga e geração durante a ocorrência de contingências no sistema;
- Suporte de potência reativa, necessário para manter o perfil de tensão nas barras do sistema.

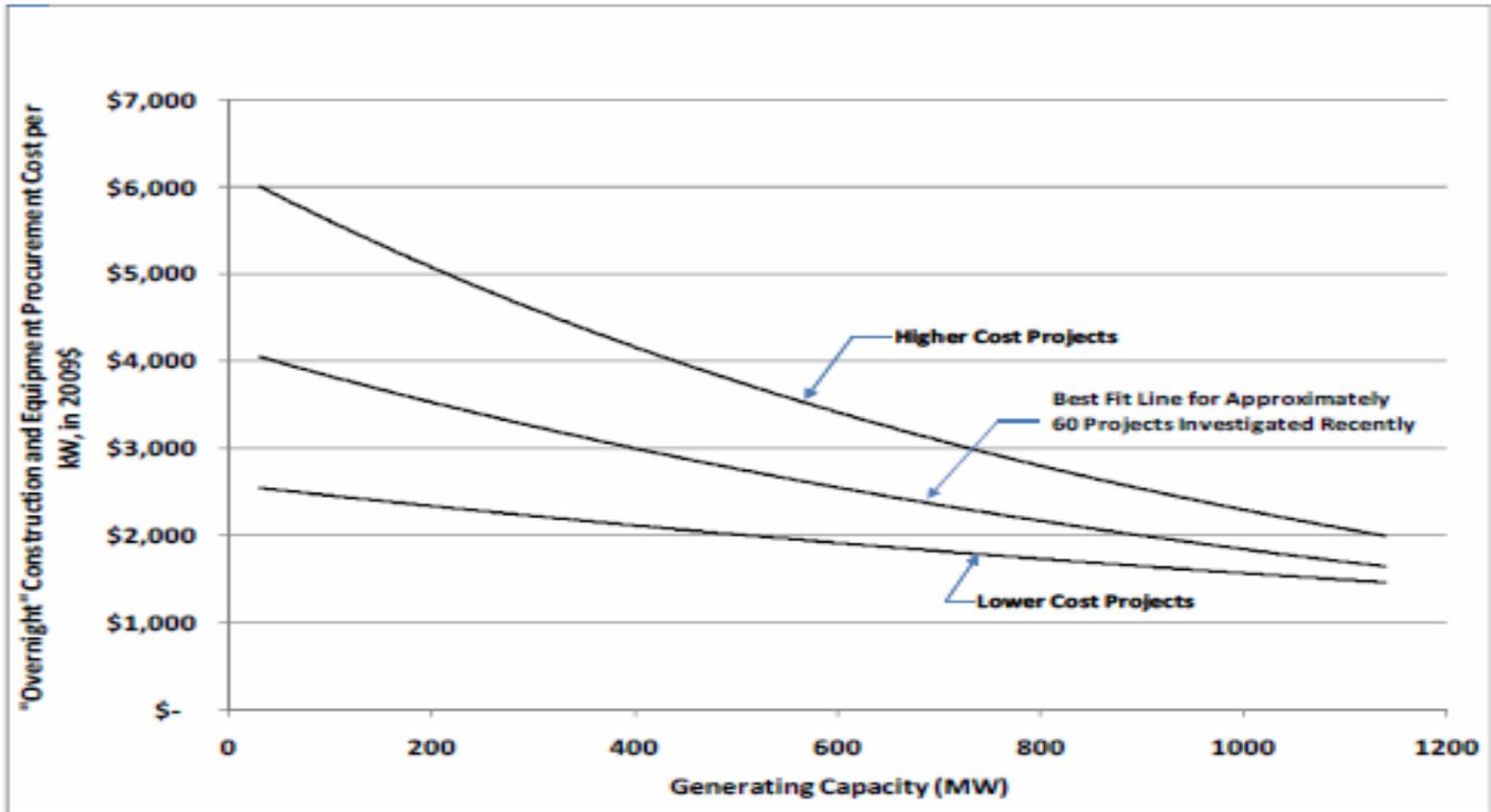
# Custos – A Experiência Americana

- Os custos das usinas reversíveis não são de fácil caracterização pois são diretamente influenciados pelas condições específicas do local do projeto, físicas, geológicas e ambientais;
- O custo de construção e aquisição de equipamentos eletromecânicos representa a parte principal do custo total do projeto, existindo entretanto outros custos a considerar:
- Investigações geológico-geotécnicas, avaliações ambientais preliminares, projetos de engenharia, aquisição de terras, financiamentos e respectivos juros, custos legais, administração do proprietário, gerenciamento da construção, alocação de riscos e reservas de contingência.

# Custos – A Experiência Americana

- Uma das mais conceituadas empresas de engenharia do mundo, MWH Global ( Fusão de Montgomery , Hawksley , Harza ) entre 2006 e 2009, realizou estudos em inúmeros locais, avaliando-os quanto à viabilidade potencial inclusive custos preliminares para a implantação de usinas reversíveis.
- A Figura a seguir apresenta as conclusões obtidas que dependem, é claro , das condições particulares prevalecentes em cada local.
- Os custos estão referenciados a 2009, abrangendo construção e equipamentos, excluindo custos indiretos com engenharia, custos legais, administração do proprietário, aquisição de terras, juros e taxas financeiras, etc.
- As tendências do gráfico mostrado a seguir representam cerca de 60 estudos preliminares de usinas reversíveis, realizados pela MWH Global entre 2006 e 2009.

# Custos – A Experiência Americana



**Figure 4-4 Indicative Overnight Construction Cost for Greenfield Pumped Storage Projects in 2009 \$**

Fonte: Technical Analysis of Pumped Storage and Integration with Wind Power in the Pacific Northwest - Final Report for: U.S. Army Corps of Engineers - Northwest Division.- August , 2009.-MWH Global

## Custos – A Experiência Americana

Potencia Instalada -Mw-	Mínimo -US\$/Kw Jun-09	Médio -US\$/Kw- Jun-09	Máximo -US\$/Kw- Jun-09
30	2.535,00	4.000,00	6.000,00
1.000	1.535,00	1.821,00	2.285,00

# Manutenção de Usinas Reversíveis

## Características da manutenção das Usinas Reversíveis

- Observações feitas com base em 35 usinas nos EUA e 11 no restante do mundo;
- Mudanças frequentes no modo operacional, partidas e paradas de motores, reversão de rotação aumentam a pressão sobre os equipamentos;
- Turbinas convencionais operam 30 a 40 anos sem necessitar grandes reparações. Turbinas reversíveis necessitam reparos a cada 10 – 15 anos;
- A manutenção das obras civis e hidráulicas das usinas reversíveis não difere muito das hidroelétricas convencionais;
- A manutenção das reversíveis é muito menor do que aquela necessária para as usinas termoelétricas;
- Manutenção preventiva das usinas reversíveis é realizada uma vez por ano, em média.

# Dimensionamentos clássicos das UHRs - EDF

As grandezas que caracterizam as UHRs são as seguintes:

- **A potência**, que pode variar entre o bombeamento e a geração (se houver influência da gravidade, por exemplo);
- **A vazão (de bombeamento e turbinada)**;
- **A constante de tempo na geração**: corresponde ao tempo necessário para esvaziar o reservatório superior ou encher o reservatório inferior, considerando a UHR funcionando a plena potência na geração.
- **Inversamente, a constante de tempo no bombeamento**: corresponde ao tempo necessário para encher o reservatório superior ou esvaziar o reservatório inferior, considerando a UHR funcionando a plena potência no bombeamento.
- A constante de tempo de uma UHR depende diretamente, portanto, do volume útil do menor de seus reservatórios e da vazão do equipamento.

Fonte: Experiência da EDF em Usinas Hidroelétricas Reversíveis na França – Seminário Eletronorte- Nov/2014 – Cedric Rogeaux

# Dimensionamentos clássicos das UHRs - EDF

Para cada UHR (volumes dos reservatórios e queda específicos), vários dimensionamentos são possíveis em função da potência instalada:

- **UHR diária** (tipo UHR de La Coche): A constante de tempo na geração é de cerca de **4 a 8 horas**. A constante de tempo no bombeamento é de cerca de 5 a 10 horas. Este tipo de UHR funciona todos os dias e utiliza diariamente todo o volume disponível (esvaziamento do reservatório superior durante o dia e enchimento na noite seguinte).
- **UHR semanal** (tipo UHR de Montézic) : A constante de tempo na geração é de cerca de **20 a 30 horas**. A constante de tempo no bombeamento é de cerca de 25 a 40 horas. Este tipo de UHR funciona todos os dias da semana e utiliza uma parte do volume. O reservatório superior é abastecido no final de semana por bombeamento contínuo, durante 25 a 40 horas.
- Outros tipos de UHRs são possíveis: sazonal.

# Velocidade Variável das Turbinas Reversíveis

## Turbina Reversível com Velocidade Variável

Fabricantes de turbinas reversíveis já estão atualmente produzindo turbinas-bomba que operam com velocidades variáveis permitindo melhor ajuste operacional, devido:

- I- Resposta mais rápida às flutuações de potência provenientes de fontes renováveis;
- II- Maior eficiência operativa no modo “bomba”, aproximando-se mais da eficiência ótima obtida para o “modo “turbina”;
- III- Possibilidade de ajustes de Potência durante as operações de bombeamento.

# Velocidade Variável das Turbinas Reversíveis

## Custo Adicional pela Introdução da Capacidade de Velocidade Variável

Os custos adicionais pela introdução de velocidade variável estão principalmente associados com o gerador, e respectivos sistemas (excitação e resfriamento) bem como com às estruturas civis para obtenção de espaço adicional para os equipamentos necessários.

# Custo da Usina com Turbinas de Velocidade Variável

Em termos aproximados verificou-se :

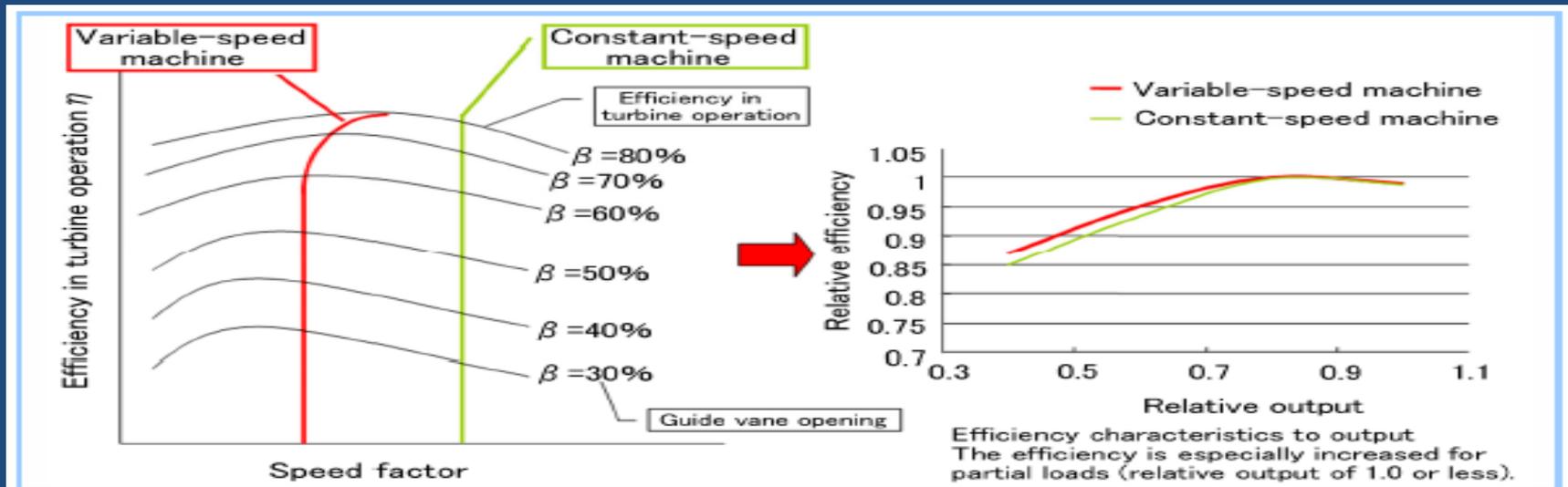
- Custo incremental de 50% a 125% para o gerador (considerado como sendo 10% do custo total)
- 10% a 15% de aumento no custo da casa de força (considerado como sendo 20% do total)
- Resultado alcançado: Aumento total de 7% a 15% do custo completo do projeto.

Fonte: Technical Analysis of Pumped Storage and Integration with Wind Power in the Pacific Northwest - Final Report for: U.S. Army Corps of Engineers - Northwest Division.- August , 2009. – MWH Global

# Velocidade Variável das Turbinas Reversíveis

Turbina de Velocidade Constante	Turbina de Velocidade Variável
Menor Custo de equipamento	Variações de queda mais ampla
Menores Dimensões da casa de força	Curva de Performance de geração mais alta e estável
Custo de O&M ligeiramente inferior	Faixa de geração operacional mais ampla

Fonte: HDR inc



**Figure 2 Efficiency characteristics of turbine operation**

The variable-speed function allows a higher operational efficiency than a constant-speed machine.

*Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 48 No. 3 (September 2011)*

## Estudos Anteriores de UHR no Brasil

- Estudos Preliminares em nível de Pré-Inventário foram realizados anteriormente no Brasil quanto a sítios prováveis para implantação de usinas reversíveis:
- Pré-Inventário ELETROBRÁS / 1979
- Relatório IPT / 1982 – Arquivos CESP

# Pré-Inventário Eletrobrás - 1979

Tabela 2 – Pré-inventário UHR Eletrobrás (1979)

Local	Alternativas	Capacidade Instalada (MW)
Região Nordeste	-	5.000
Minas Gerais	-	24.000
Rio de Janeiro	-	260.000
<b>Total</b>	-	<b>289.000</b>

Fonte: Ciclo de Debates “UHR no programa de expansão da Hydro Quebec”, Eletrobrás, 1981

Sabe-se que existe um enorme potencial para UHR na região Sul.

**Nota:** Tabela acima extraída do documento “A Retomada do Conceito de Usinas Hidroelétricas Reversíveis no Setor Elétrico Brasileiro”.- Engos. Sergio Zucolin-CESP, Miriam Adelaide R. Pinto-Hedaidi Enga. e Paulo S.F. Barbosa- Unicamp.

# Pré-Inventário no Estado de São Paulo - 1982

Tabela 1 – Pré-inventário UHR no Estado de São Paulo (1982)

Local	Alternativas	Capacidade Instalada (MW)
Serra do Mar	37	150.000
Serra da Mantiqueira	19	32.200
Serra Geral	12	17.500
<b>Total</b>	<b>68</b>	<b>199.700</b>

Fonte: Relatório IPT 17.316 de 21 de dezembro de 1982, Arquivos CESP

**Nota:** Tabelas acima extraídas do documento “A Retomada do Conceito de Usinas Hidroelétricas Reversíveis no Setor Elétrico Brasileiro”.- Engos. Sergio Zucolin-CESP, Miriam Adelaide R. Pinto-Hedaidi Enga. e Paulo S.F. Barbosa- Unicamp

# PERSPECTIVAS FAVORÁVEIS PARA IMPLANTAÇÃO DE UHR NO BRASIL

- Tendência de aumento das usinas a fio d'água e termoelétricas e das fontes renováveis: Eólicas e Fotovoltaicas;
- Grande dificuldade para a construção de usinas hidroelétricas com reservatórios plurianuais na Amazônia (onde ainda existe disponibilidade) e as grandes distâncias para linhas de transmissão;
- Perda gradativa da capacidade de armazenamento de energia dos principais reservatórios das regiões sudeste e nordeste.

# PERSPECTIVAS FAVORÁVEIS PARA IMPLANTAÇÃO DE UHR NO BRASIL

- Dificuldade para suprimento de ponta pelo sistema;
- Os sítios potenciais para usinas reversíveis encontram-se principalmente no interior do país, próximos aos centros de carga das regiões sudeste e sul , conforme antigos diagnósticos ;
- A construção de usinas reversíveis nestas áreas auxiliaria para firmar e aproveitar os excedentes das usinas a fio d'água da Amazônia e das fontes renováveis;
- Capacidade da Engenharia Nacional em todo o processo de planejamento, projeto, construção, fornecimento de equipamentos e operação e manutenção.

# Conclusões

- Brasil tem capacidade para retomar o processo de usinas reversíveis com alto domínio de engenharia e tecnologia.
- O Mundo continua investindo e aprimorando neste tipo de armazenamento, como as demais tecnologias de armazenamento de energia, pelos benefícios oferecidos ao sistema.
- Para sua viabilidade é necessário que :
  - Sejam identificados e quantificados todos os benefícios.
  - Sejam estabelecidos procedimentos regulatórios e comerciais para a venda destes serviços.