

Empresas Contratantes



PAULISTA LAJEADO

Entidades Executoras



Projeto PD-00642-2705/2019

*Usinas Hidrelétricas Reversíveis Combinadas
com Hidrelétricas em Cascata e seus Benefícios
para a Gestão do Setor Elétrico Brasileiro*

Apresentação Seminário Experiências Internacionais

ONS 12/03/2020

***Aspectos Técnicos e Operativos das UHRs no Setor Elétrico:
As Experiências Internacionais***

**Prof. Sergio Bajay, Prof. Paulo Barbosa, Enga. Mirian Adelaide
M.Sc. Jorge Yassuoka, M.Sc. Vinicius Pinheiro**

SUMÁRIO

- 1. Seleção de Países para Estudos**
- 2. Projeto de UHR x UHEs: Similaridades e Diferenças**
- 3. Opções Tecnológicas de Projeto de UHRs (Resumo)**
- 4. Overview sobre Projetos em Países Selecionados**

Portugal, Espanha, Japão, Alemanha, Suíça, EUA
- 5. Conclusões**

1. Seleção de Países para Estudos

Europa: Portugal –Espanha; Alemanha; Suíça

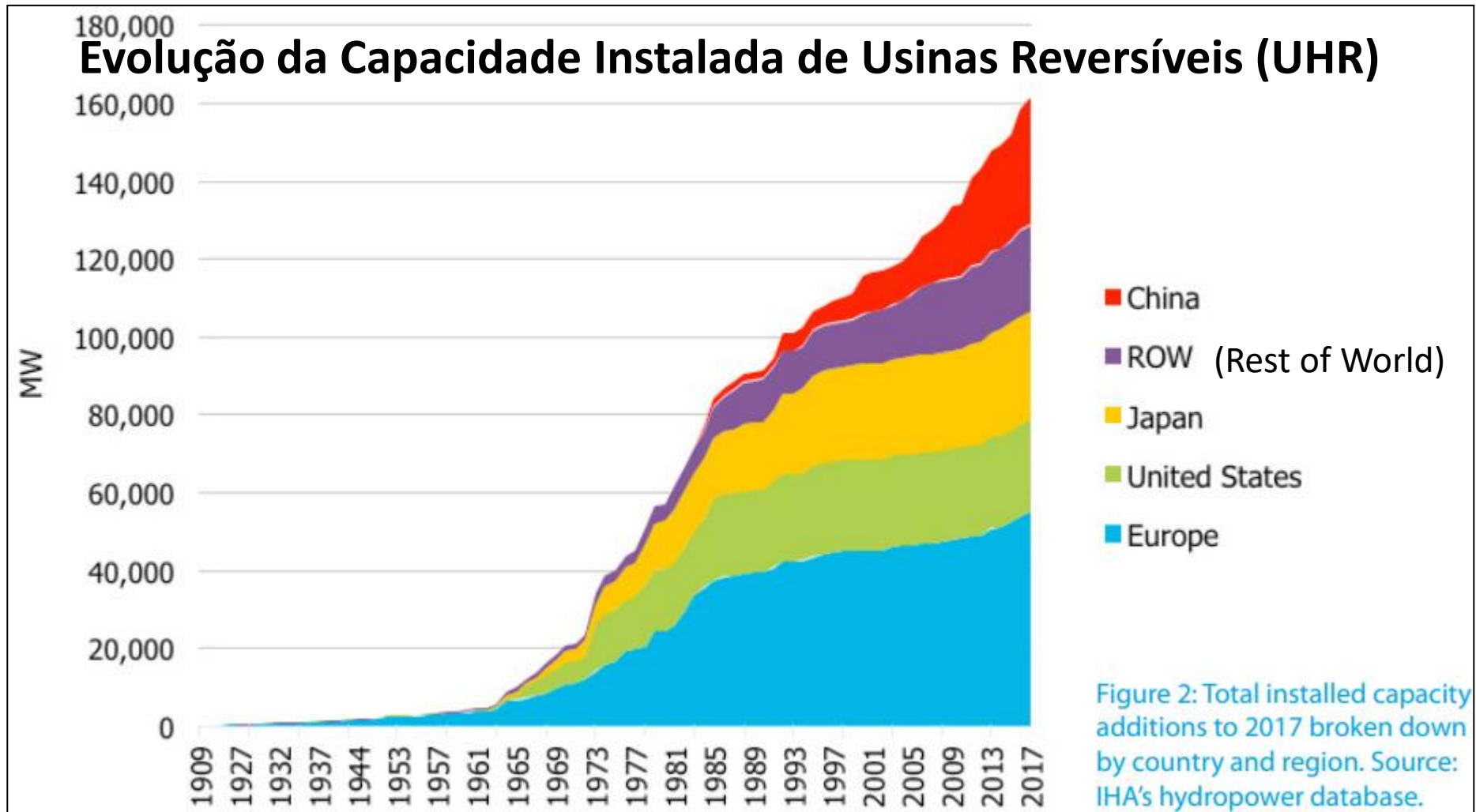
America: EUA

Asia: Japão, China

Por que esta seleção?

- Reúne os 3 países com maior capacidade instalada do mundo
- O conjunto traz bom número de plantas recentes (pós-2001)
- Razoável acesso aos dados
- Tais países tem um número significativo de usinas hidrelétricas reversíveis-UHR, com diferentes características quanto ao porte, tecnologias, arranjo de projeto e data de início de operação
- Presença de geração renovável intermitente

1. Seleção de Países para Estudos



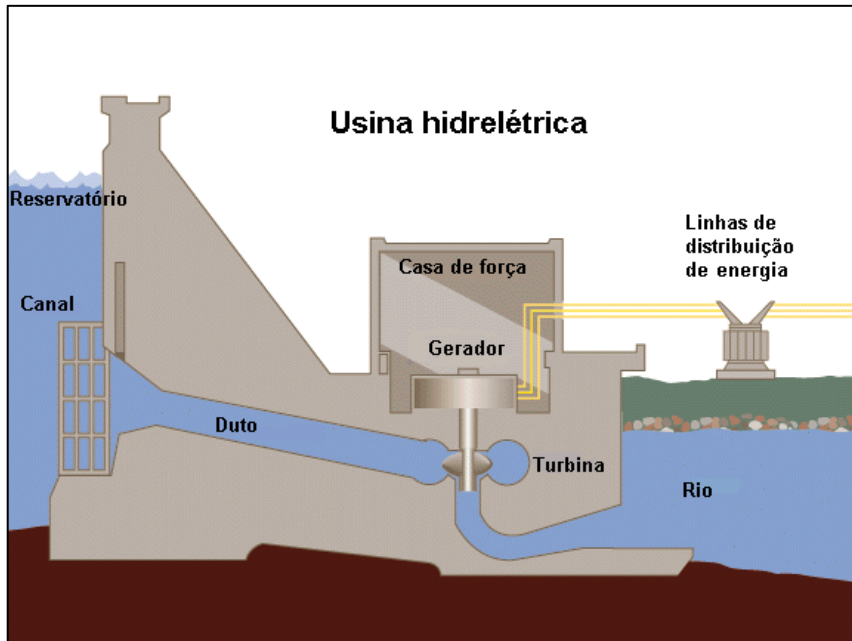
1. Seleção de Países para Estudos

País	Capac. Hidrelétrica (GW)	Capac. UHR (GW)
China	352	30 (23,14 GW após 2001)
Brasil	104	
EUA	103	22,9
Canadá	81	0,2
Japão	50	27,6
India / Russia	50 / 49	2,6 / 1,4
Noruega	32	1,4
Turquia / França / Italia	28 / 26 / 23	7,0 / 7,6 / 6,2
Espanha	20	6,2
Suíça	17	4,8 (2,38 GW após 2001)
Alemanha	11,3	6,8 (Goldisthal, 2004: 1.060MW)
Portugal	6,4	2,8 (11 plantas após 2001)
TOTAL (World)	1.292 GW	160,3 GW

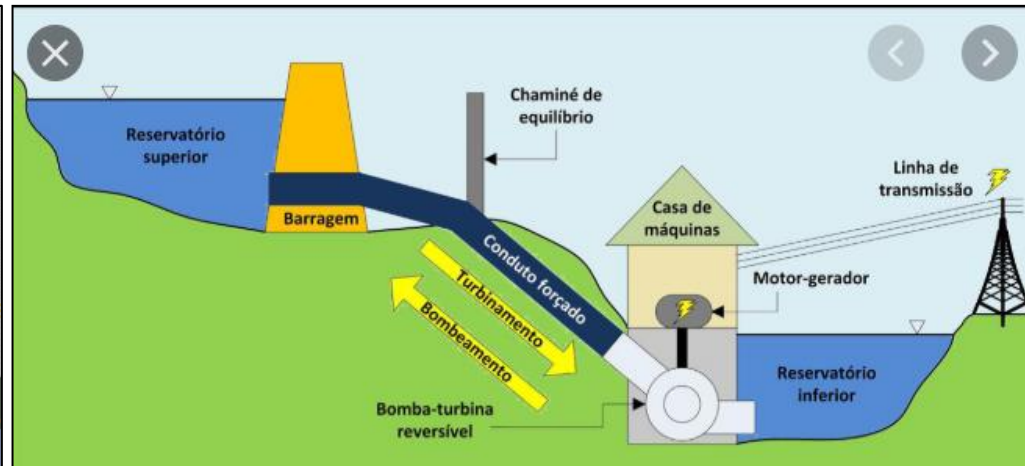
(fonte: IHA, 2018)

2. Projeto de UHRs x Projeto de UHE convencionais: *Similaridades*

Usina Hidrelétrica Convencional-UHE



Usina Hidrelétrica Reversível-UHR



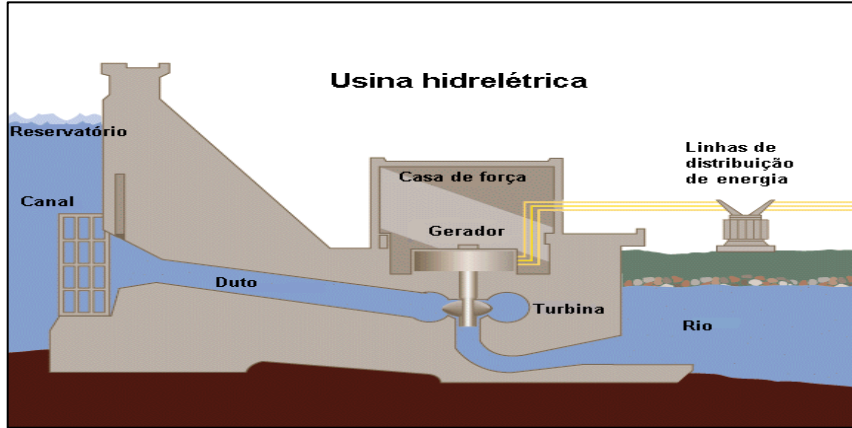
- ambas usam água como combustível
- ambas são tecnologias provadas
- ambas produzem impactos ambientais

Ambas tem componentes da obra civil similares (UHEs e UHRs):

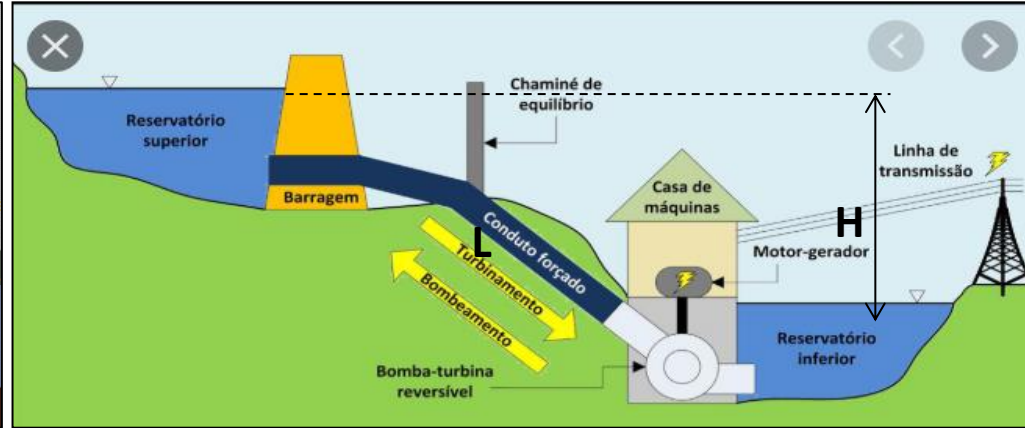
reservatórios, barramento, tomada d'água, conduto forçado, casa de força, máquinas hidráulicas, máquinas elétricas, equiptos de automação e controle

2. Projeto de UHRs x Projeto de UHE convencionais: Diferenças

Usina Hidrelétrica Convencional-UHE



Usina Hidrelétrica Reversível-UHR



- As UHRs podem ter comprimentos mais longos de tubos / condutos forçados (L) (bons projetos $L < 10 H$)
- Os reservatórios (superior e inferior) podem ser muito menores (closed-loop).

Exs. de UHRs

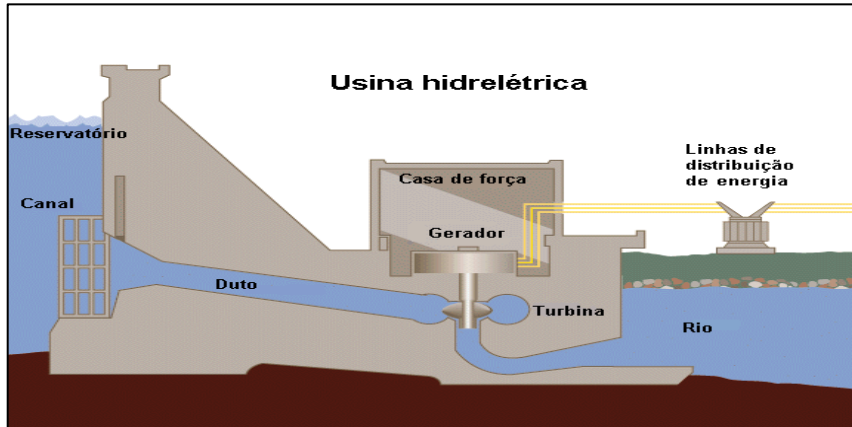
Bath County-EUA ($H = 380\text{m}$, $P = 3.003\text{ MW}$) Vol. Sup = $43,9\text{ hm}^3$ Vol.inf = $34,4\text{ hm}^3$
 Caraguatatuba –Projeto ($H = 700\text{ m}$ $P = 786\text{ MW}$) Vol. Res inf. = $7,5\text{ hm}^3$

Exs. de UHEs:

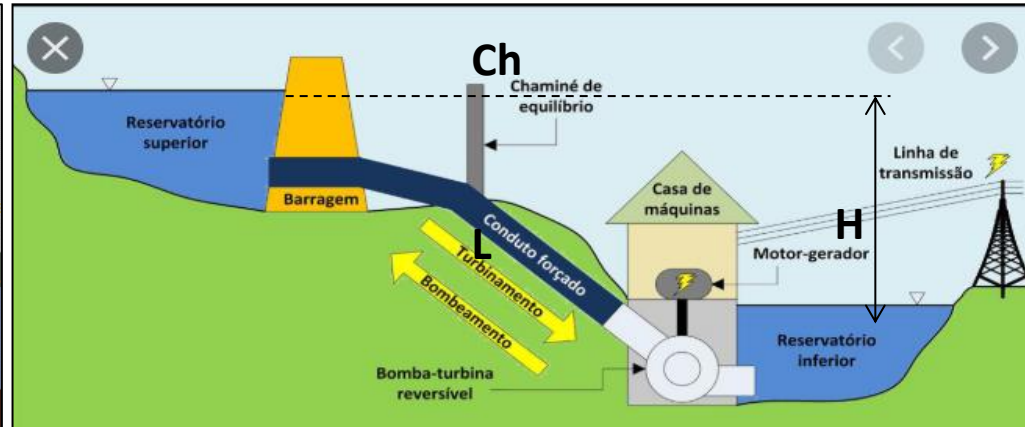
Emborcação(Cemig):	$P = 1.192\text{ MW}$	Vol.sup = 13.056 hm^3
Segredo (Copel):	$P = 1.260\text{ MW}$	Vol. Sup = 2.940 hm^3

2. Projeto de UHRs x Projeto de UHE convencionais: *Diferenças*

Usina Hidrelétrica Convencional-UHE



Usina Hidrelétrica Reversível-UHR



- Casa de Força: **UHRs** têm mais casos de unidades enterradas, em cavernas
- Chaminé de Equilíbrio **Ch** (para atenuar sobre-pressões e sub-pressões nos tubos): são mais frequentes em **UHRs** (diante do maior compr. L dos tubos)
- Dimensionamento das Máquinas Hidráulicas (Turbina-bomas): **paredes mais espessas**, pois têm que resistir a sobre-pressões dos transientes hidráulicos nas trocas dos modos de operação turbina-bomba (não é manobra lenta..)
- UHRs têm **vertedores** de menor porte (o resev. superior é menor, e menor a bacia contribuinte e estruturas de dissipação de energia a eles associadas)

3. Opções Tecnológicas de Projeto de UHRs (Resumo)

3.1 Quanto à localização (Site) da UHR – Solução Ideal

- queda alta (competividade de custos)
- Aproveitamento de reservatórios / estruturas existentes
- baixo impacto ambiental
- proximidade de linha de transmissão (bombeam. e turb.)
- necessidade do grid (intermitência, capacidade de ponta, etc)

3.2 Fixação de Variáveis de Projeto (Interdependentes):

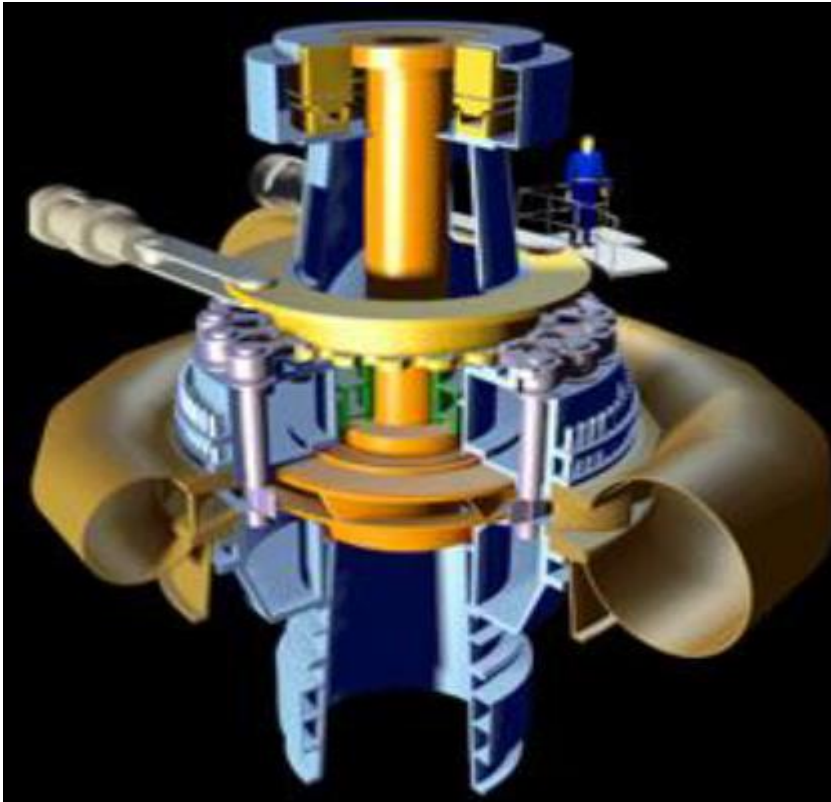
- Porte dos reservatórios – define o tempo de descarga enquanto turbinamento (exs. 5h na ponta– ciclo diário; 20h de descarga: ciclo semanal)
- **Qto maior a queda H**, menor será o diâmetro dos tubos, menores diâmetros de rotores das turbina-bombas
- **Qto maior o L/H**: menor o tempo de resposta nas manobras

3. Opções Tecnológicas de Projeto de UHRs (Resumo)

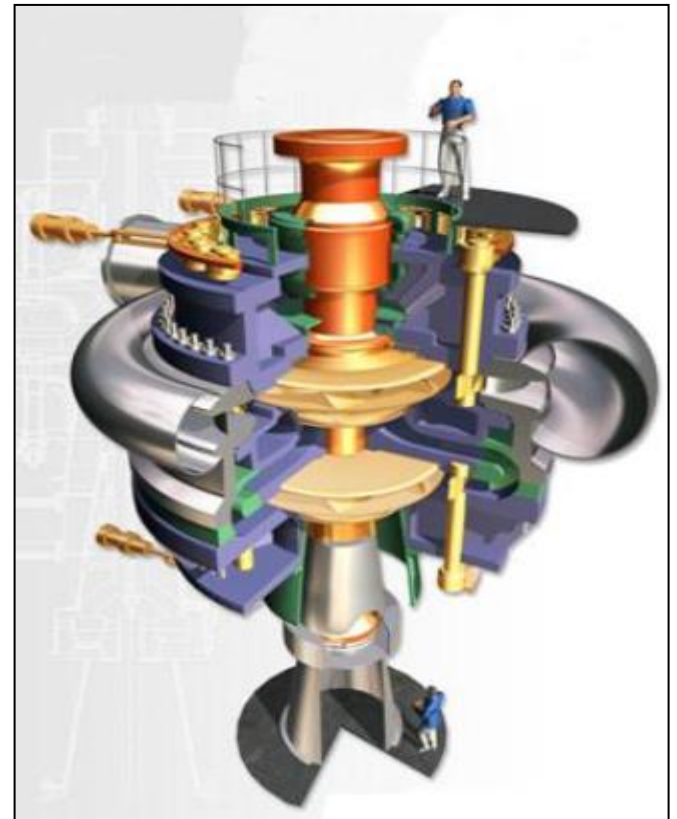
3.3 Tipos de Máquinas Hidráulicas e Arranjos (Turbina-Bombas)

3.3.1 Conjunto Binário (Turbina-Bomba em mesma máquina)

Único Estágio ($H < 700$ m)

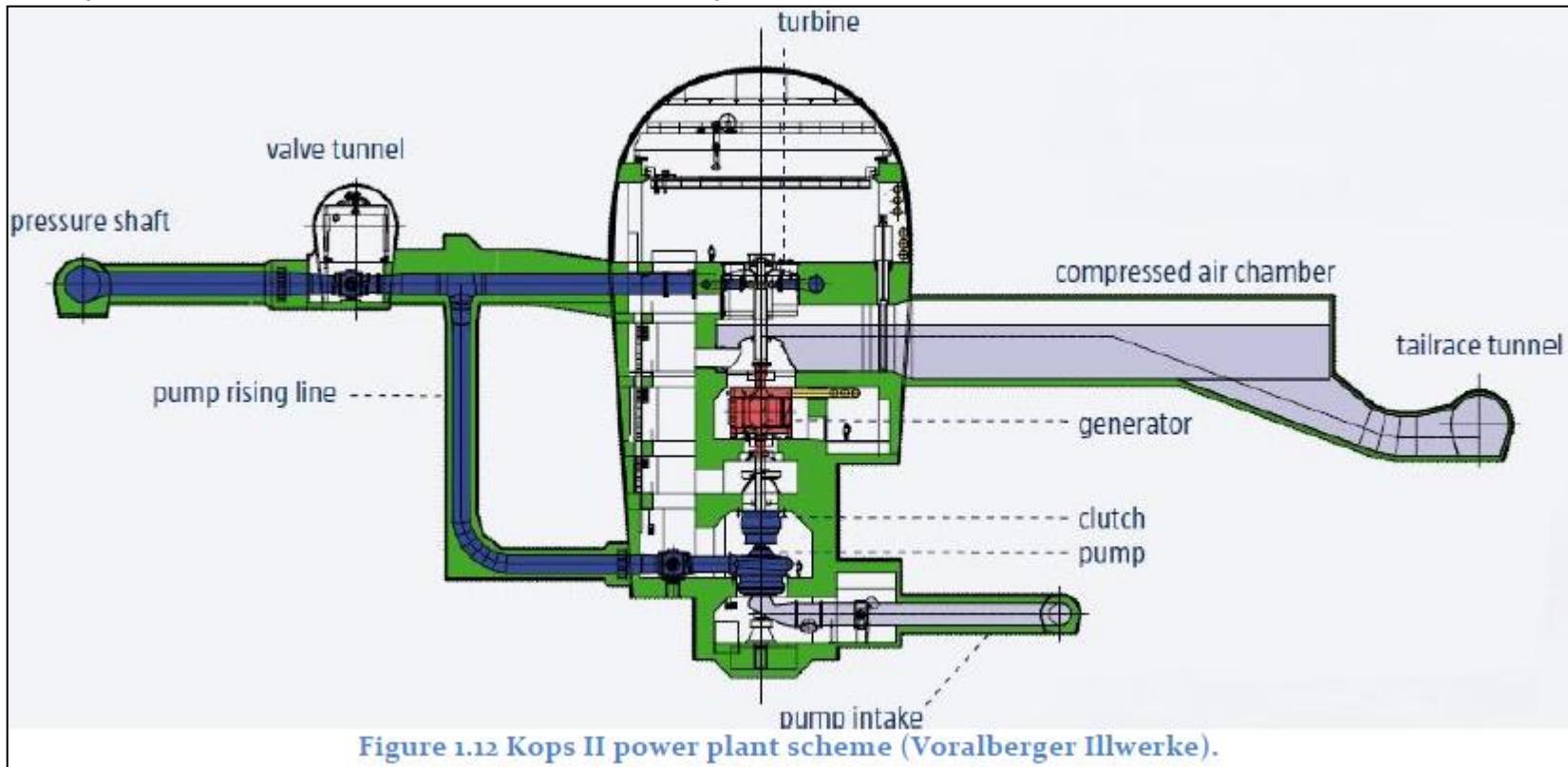


Múltiplos Estágios ($700 < H < 1200$ m)



3. Opções Tecnológicas de Projeto de UHRs (Resumo)

3.3.2 **Conjunto Ternário** (Turbina-Bomba em mesmo eixo vertical, mas em máquinas diferentes, com projeto otimizado/dedicado —portanto mais eficientes que a Binária)



3. Opções Tecnológicas de Projeto de UHRs (Resumo)

3.3.2 Conjunto Ternário, operação em Curto-Circuito Hidráulico

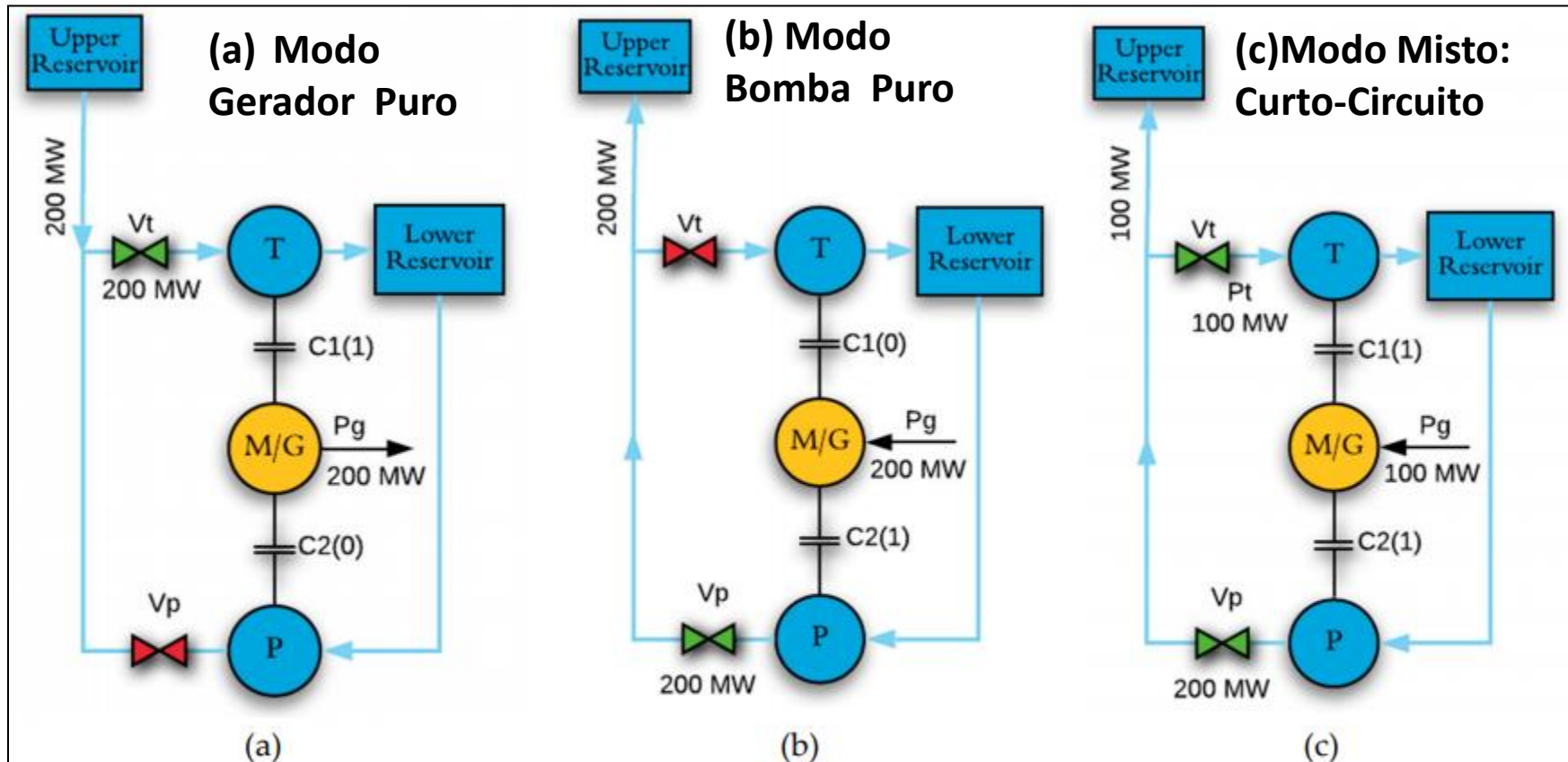
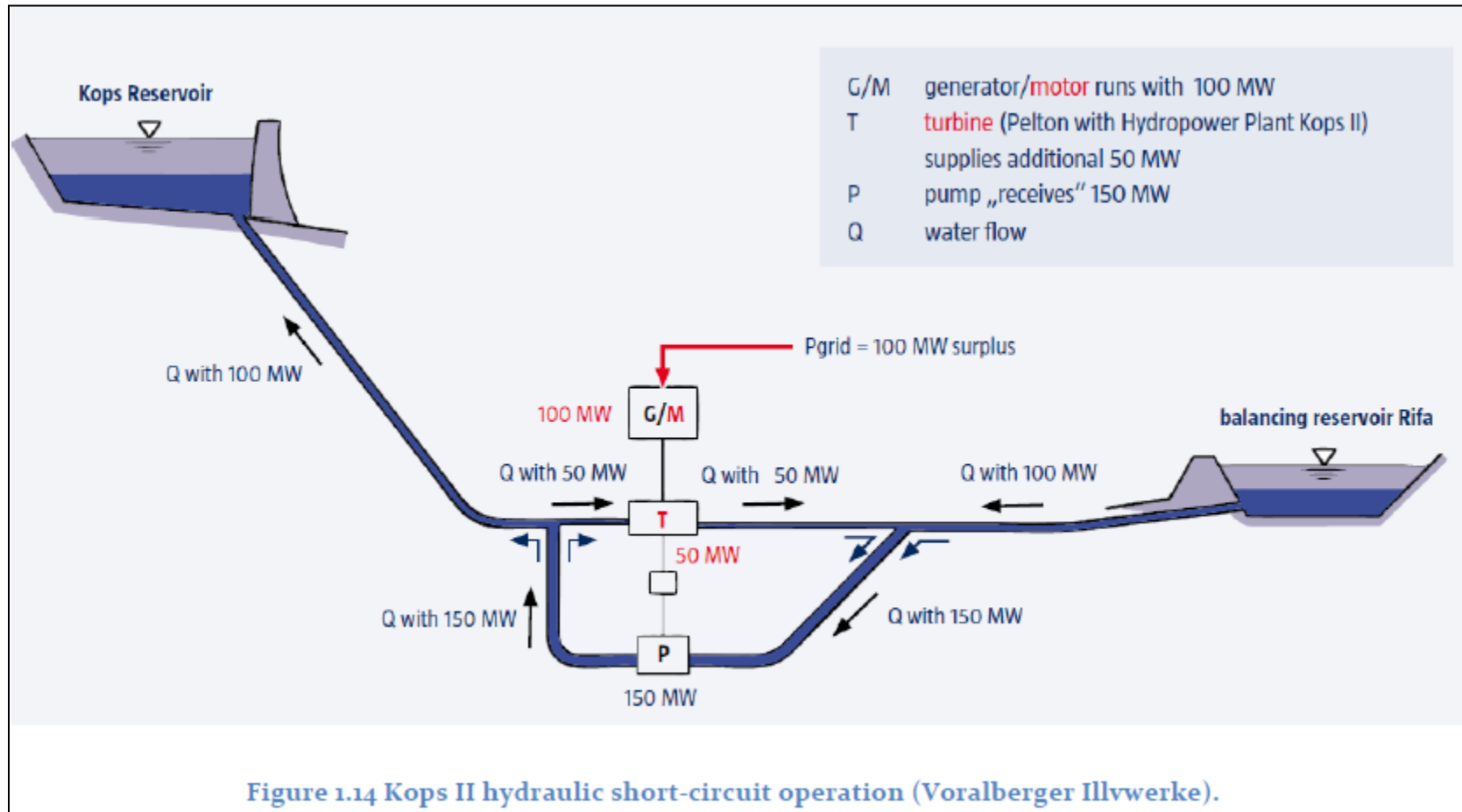


Figure 2. Modes of operation of ternary pumped storage hydro (TPSH) with the status of valves and clutches: (a) Generator mode; (b) pure pump mode; and (c) hydraulic short circuit mode (HSC). Clutches $c1$ and $c2$ are either in open mode (status 0) or closed mode (status 1). The turbine valve Vt and pump valve Vp are either in the open mode (status green) or in the closed mode (status red).

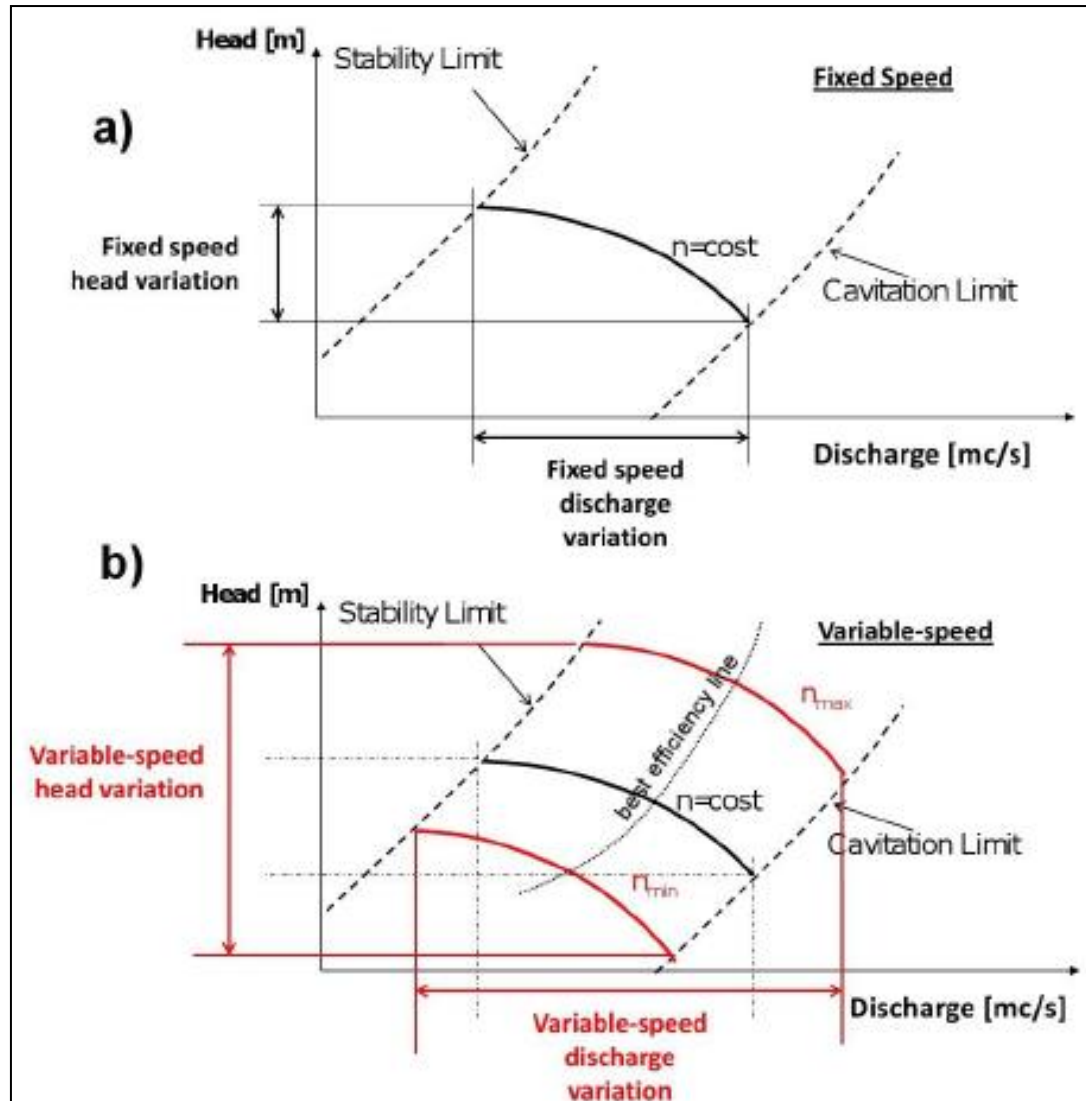
3. Opções Tecnológicas de Projeto de UHRs (Resumo)

3.3.2 Conjunto Ternário, operação em Curto-Circuito Hidráulico



3. Opções Tecnológicas de Projeto de UHRs (Resumo)

3.4 Velocidade de Rotação das Máquinas: Fixa ou Variável



Rotação Fixa (n : constante)

- É a tecnologia mais antiga
- Mais econômica
- É empregada na grande maioria dos projetos

Rotação Variável (múltiplos n : várias curvas de bomba)

- Amplia a faixa de operação
- Mais Cara
- Poucos projetos, mas vem crescendo

4. Overview sobre Projetos nos Países Selecionados

4.1 Japão

Demanda Média (Carga de Energia): 97 GW-medios Demanda Máxima: 165 GW

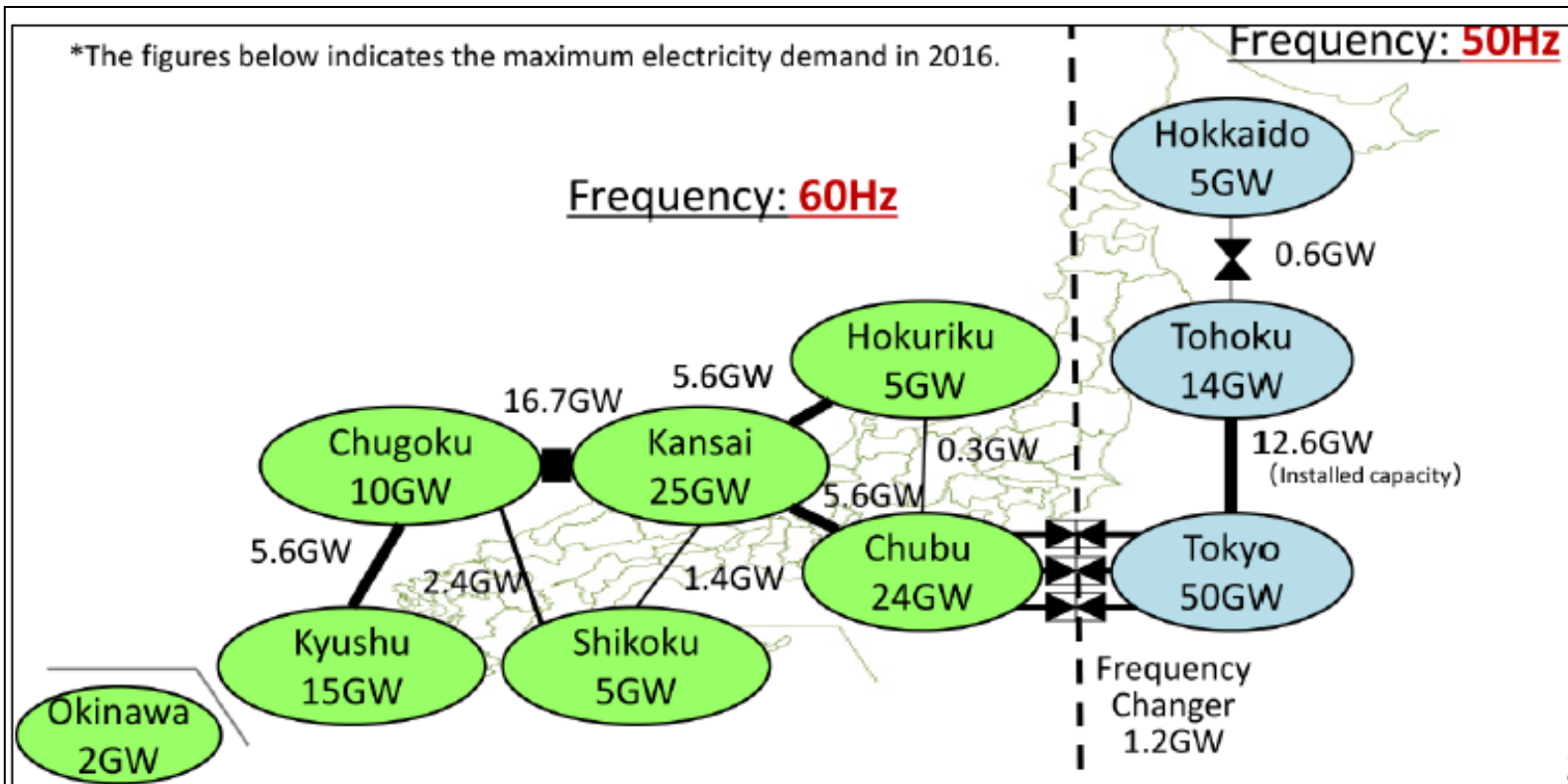
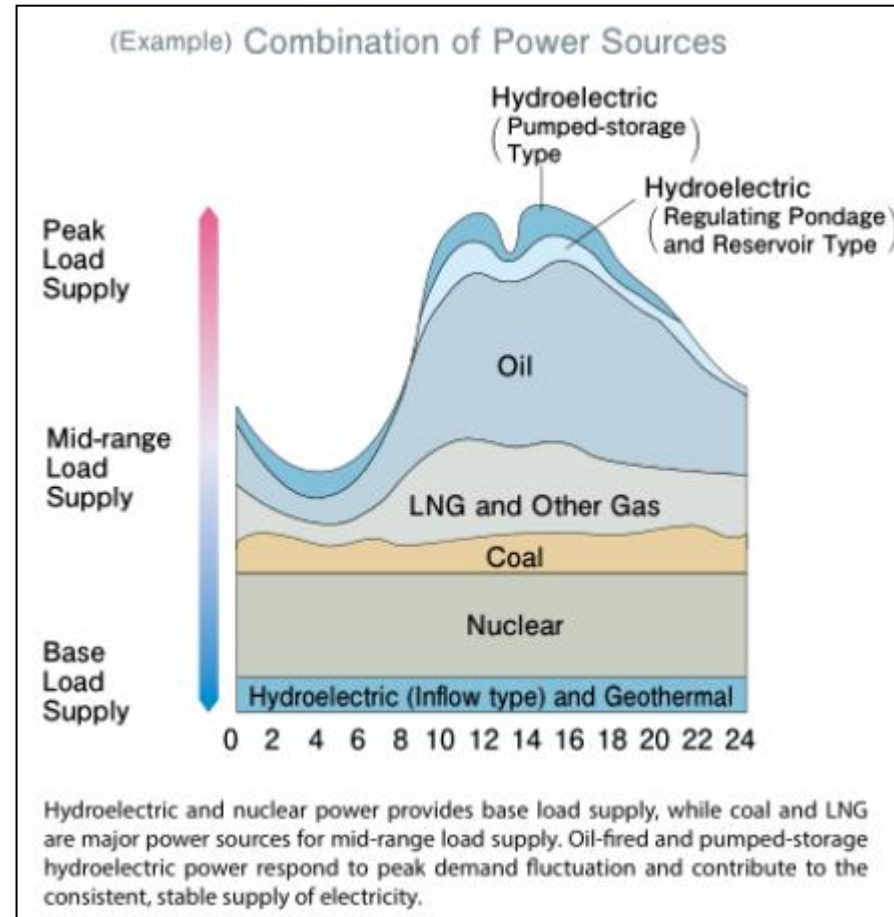
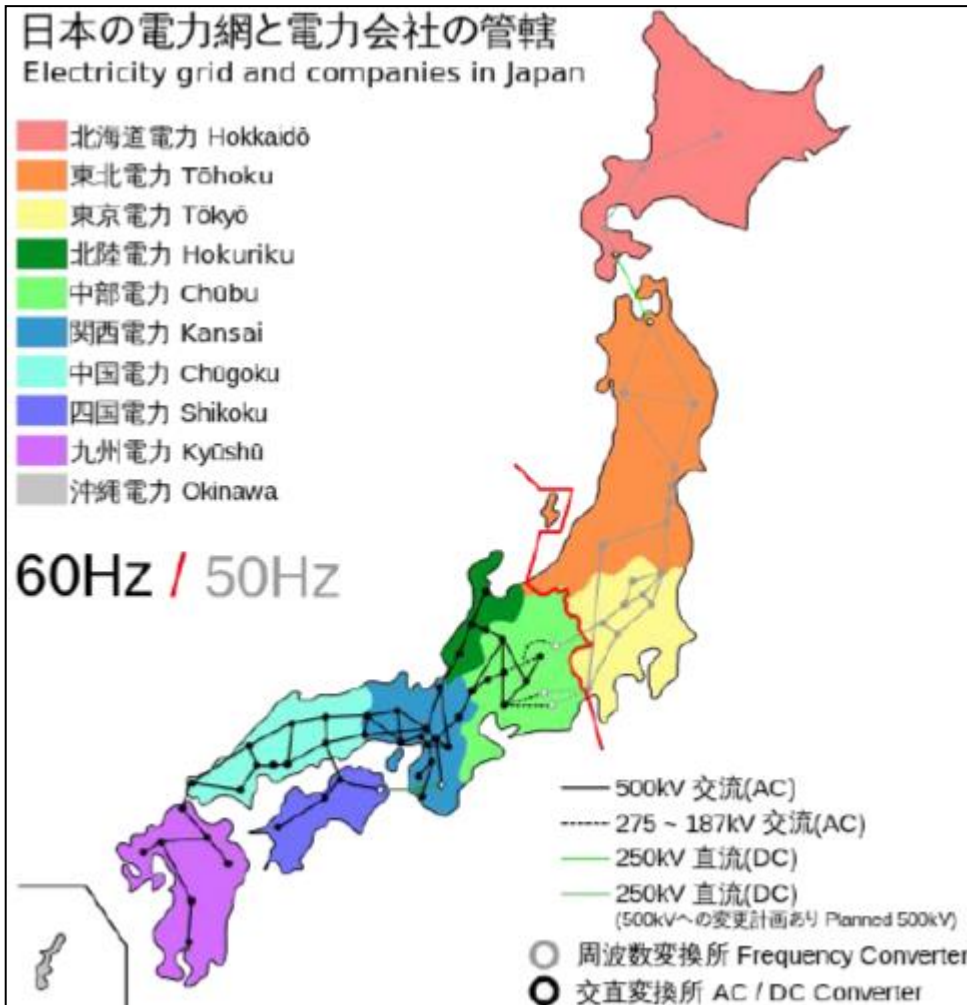


Figura 7.10 – Demanda máxima por região e potência máxima de intercâmbio.

Fonte: EGC 2018, Electricity System and Market in Japan

4. Overview sobre Projetos nos Países Selecionados

4.1 Japão



4. Overview sobre Projetos nos Países Selecionados

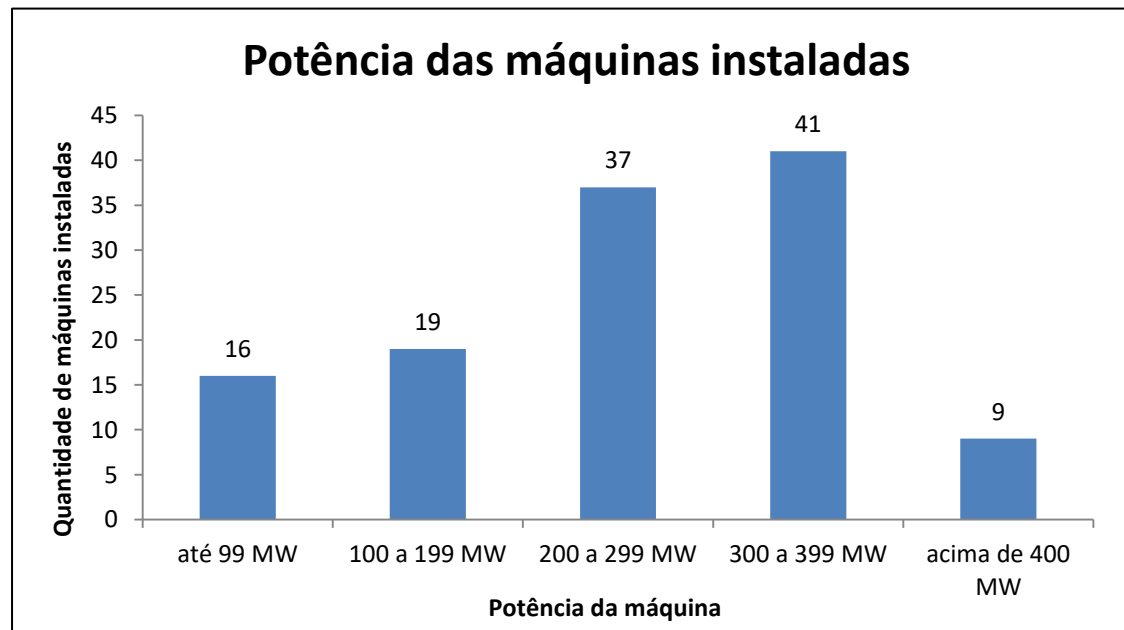
4.1 Japão

- **45** UHRs em funcionamento, 1 em construção e 1 descomissionada
- Apenas 1 usina reversível no Japão foi descomissionada: a Usina Yanbaru em Okinawa, a qual foi a primeira reversível no mundo a utilizar bombeamento noturno da água do mar. Devido ao baixo crescimento da demanda por energia elétrica em Okinawa e por não ser rentável, ela foi desligada em 2016.
- 11 são de **circuito aberto** e 36 de **circuito fechado**
- Apenas 14 máquinas instaladas em **9 usinas** são de **velocidade variável**
- Quase todas utilizam turbina modelo **Francis**, apenas duas utilizam a do tipo Deriaz. Todos os fabricantes são japoneses (Hitachi, Toshiba, Mitsubishi, Melco e Fuji Electric)

4. Overview sobre Projetos nos Países Selecionados

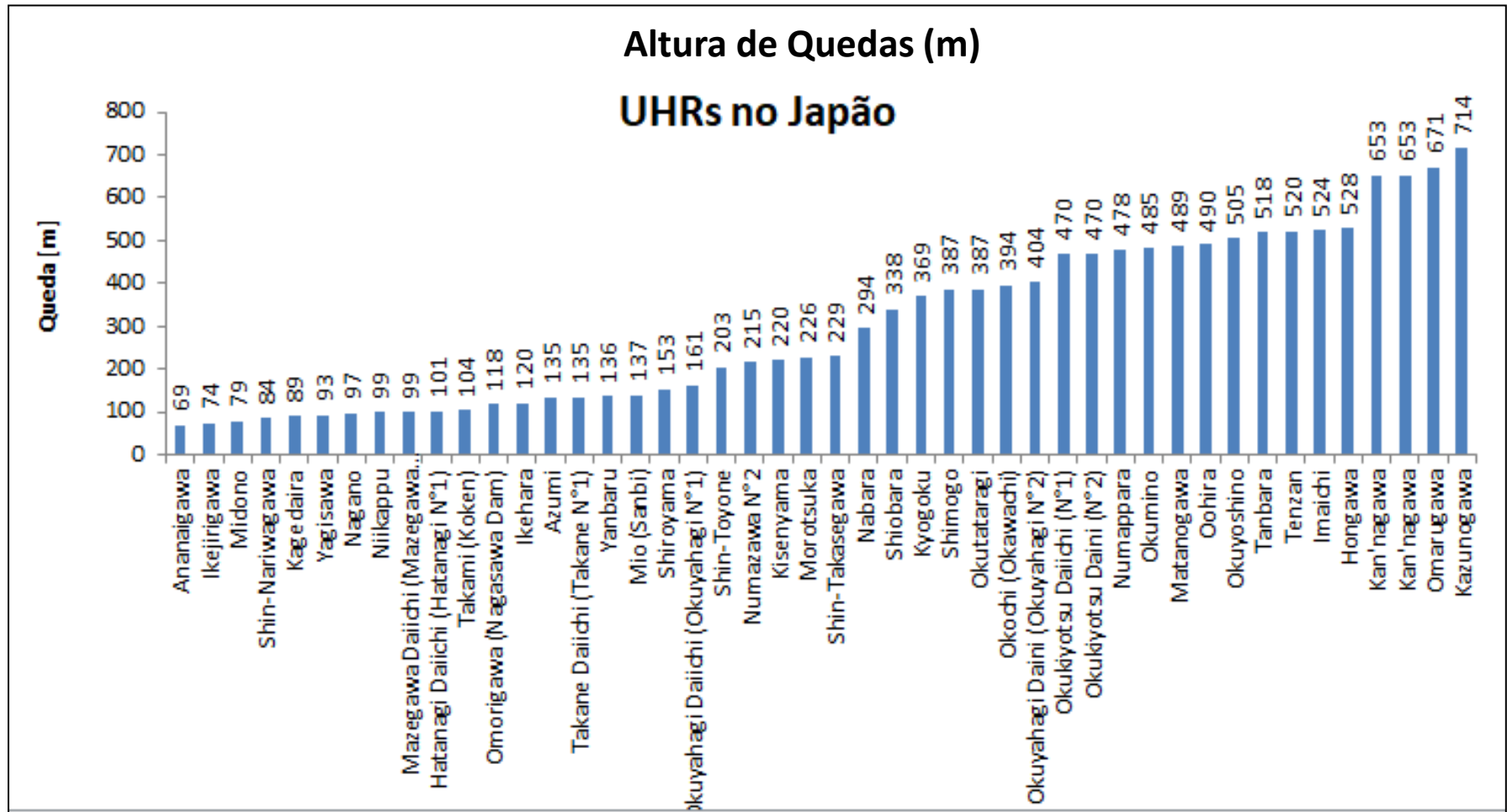
4.1 Japão

- Todas as usinas estão conectadas no grid regional de cada distribuidora
- Todas operam em ciclo diário para atender a demanda de ponta
- Com o aumento das fontes incentivadas injetando no grid (eólica e solar), as reversíveis têm sido operadas para ajudar na estabilidade da rede.



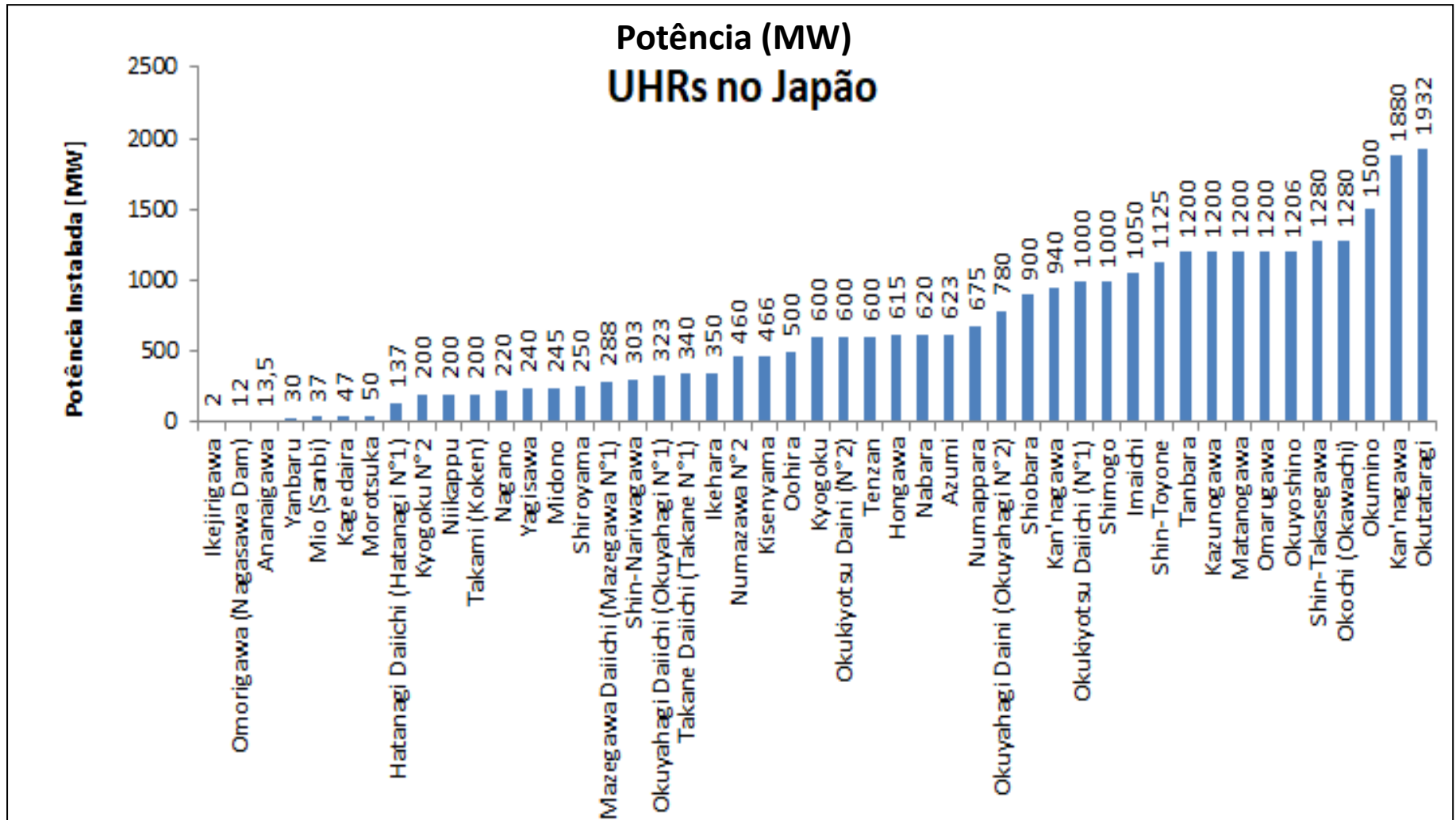
4. Overview sobre Projetos nos Países Selecionados

4.1 Japão



4. Overview sobre Projetos nos Países Selecionados

4.1 Japão



4. Overview sobre Projetos nos Países Selecionados

4.2 Alemanha

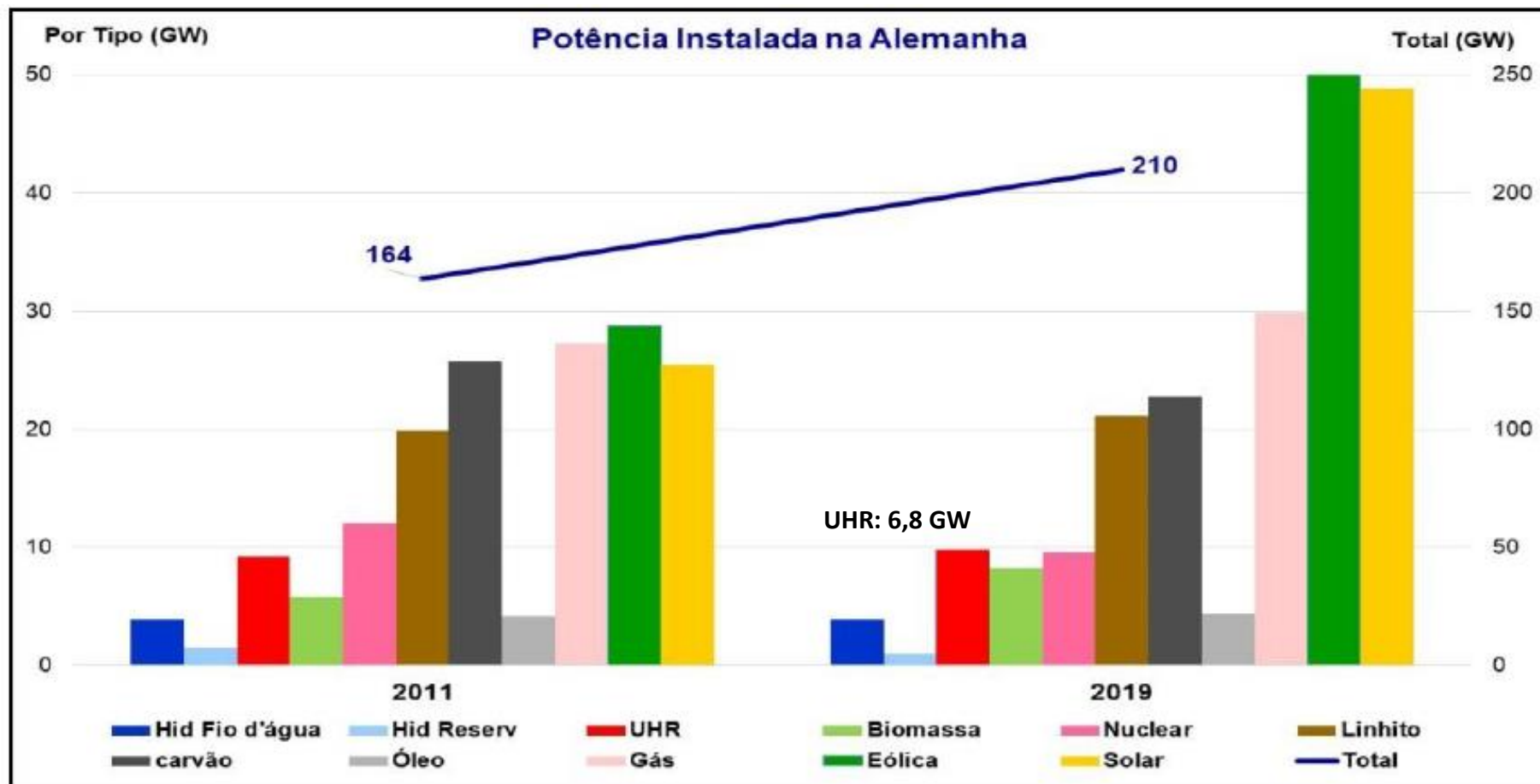


Figura 4.11: Potência Instalada na Alemanha

4. Overview sobre Projetos nos Países Selecionados

4.2 Alemanha

As alturas de queda são inferiores àquelas dos Alpes, de outros países vizinhos (Austria e Suíça), na faixa mais usual entre 100 e 300m. É interessante notar que o ciclo maior de novas usinas se deu nas **décadas de 60 e 70.**

Nome	Circuito	Comis-sionamento	Veloci-dade	Queda Max. (m)	Capac. Geração (MW)	Capac. Bom-beamento (MW)	Energia Estocada (GWh)
Schwarzenbach	Fechado	1926	fixa	368	43	43	-
Niederwartha	Fechado	1930	fixa	142	40	40	0,59
Bleiloch	Fechado	1932	fixa	49	80	80	0,64
Waldech I	Fechado	1932	fixa	296	143	143	0,49
Sorpekraftwerk	Aberto	1935	fixa	56	8	6	-
Hohenwarte 1	Fechado	1942	fixa	56	63	60	0,50
Hohenwarte 2	Fechado	1965	fixa	303	318	318	2,09
Witznau	Fechado	1943	fixa	250	220	128	0,64
Ruselkraftwerke	Aberto	1949	fixa	670	14	4	-
Waldshut	Aberto	1951	fixa	160	150	80	0,48
Reisach	Fechado	1955	fixa	188	99	84	0,63
Happurg	Fechado	1958	fixa	211	160	160	0,90

4. Overview sobre Projetos nos Países Selecionados

4.2 Alemanha

Nome	Circuito	Comis-siona-mento	Veloci-dade	Queda Max. (m)	Capac. Geração (MW)	Capac. Bom-beamento (MW)	Energia Estocada (GWh)
Geesthacht	Fechado	1958	fixa	83	120	96	0,60
Leitzack 2	Fechado	1960	fixa	128	50	37	0,55
Leitzack 1	Fechado	1983	fixa	128	49	45	0,55
Erzhausen	Fechado	1964	fixa	293	220	220	0,94
Glens	Fechado	1964	fixa	292	90	68	0,56
Wendefurth	Fechado	1967	fixa	125	80	72	0,52
Bad Sackingen	Fechado	1967	fixa	400	360	300	-
Ronkhausen	Fechado	1969	fixa	266	140	140	0,69
Wehr	Fechado	1976	ternári a	626	910	980	6,07
Langenprozelten	Fechado	1976	fixa	310	164	154	0,95
Markersbach	Fechado	1979	fixa	288	1.050	1.050	4,02
Koepchenwerk	Fechado	1989	fixa	165	153	154	0,59
Goldisthal	Fechado	2003	variáv el	302	1.060	1.060	8,48

Verifica-se que a grande maioria (22 de um total de 27 usinas) é de ciclo fechado e que, 26 são de velocidade fixa.

4. Overview sobre Projetos nos Países Selecionados

4.2 Alemanha

UHR Goldisthal - Alemanha



Localização: Thuringian Slate Mountains,



- Capacidade: 1.060 MW
- Comissionamento: 2004
- Tempo de descarga: 9h
- Turbinas: 4 x 265 MW Francis
- Queda: 301,65 m
- $Q = 103 \text{ m}^3/\text{s}$ (turbina)
- $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ (bomba)

- Proprietário: Vattenfall
- Tipo: Open-loop

Capacidades dos Reservatórios:

Superior: 12 hm³ (3,4 km de perímetro)
Inferior: 18,9 hm³

4. Overview sobre Projetos nos Países Selecionados

UHR Goldisthal - Alemanha

Facts

Country	Germany
Electricity capacity	1,060 MWe
Stream	Schwarza
Head	302 m
Water discharge	103 m ³ /s
Turbine type	Francis / Ossberger
Vattenfall ownership share	100 %
Status	In operation



Tempo de Partida:

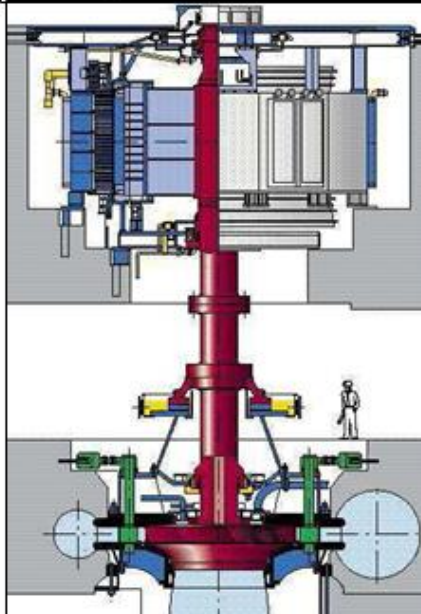
Turbina = 75 s

Bomba = 185 s

Tempo de Inversão

Bomba-Turbina:

85 segundos



Custo:

620 milhões Euros

Turbina = 75 s

Bomba = 185 s

Tempo de Inversão

Bomba-Turbina:

85 segundos

Arranjo de máquinas:

- 2 grupos síncronos (2 x 265) = 530 MW
Cada um operando entre 100 a 265 MW
- 2 grupos assíncronos /veloc. variável (2 x 265) = 530 MW, cada um operando em range 40 a 265 MW

4.3 Projetos UHR na Suíça



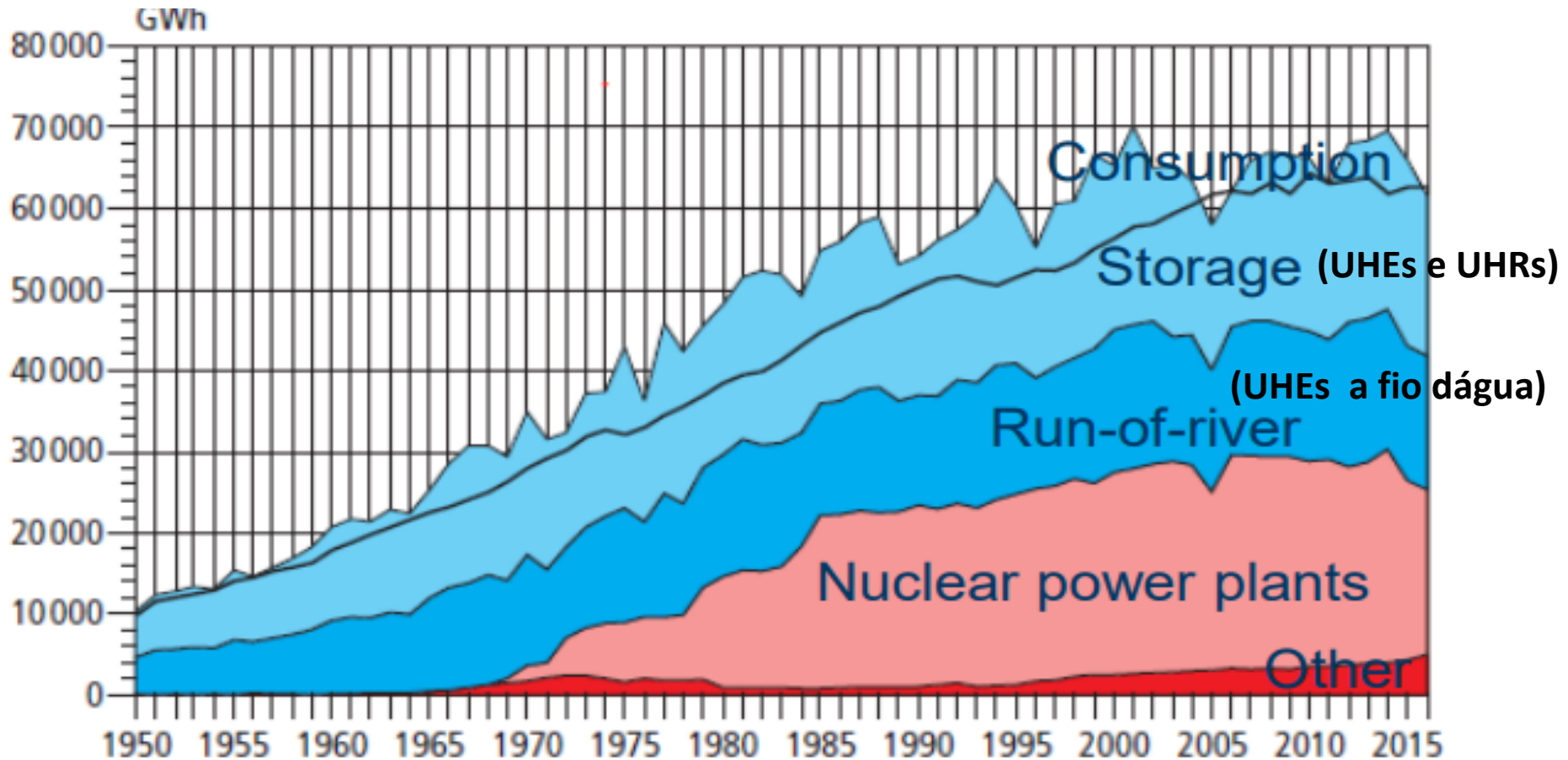
Importância Estratégica da Hidroeletricidade na Suíça:

- responde por 57% da produção anual de energia elétrica
- energia renovável, não fóssil, com baixa externalidade
- produção flexível e armazenável

Política de Longo Prazo: manter produção anual de 37,4 TWh anuais

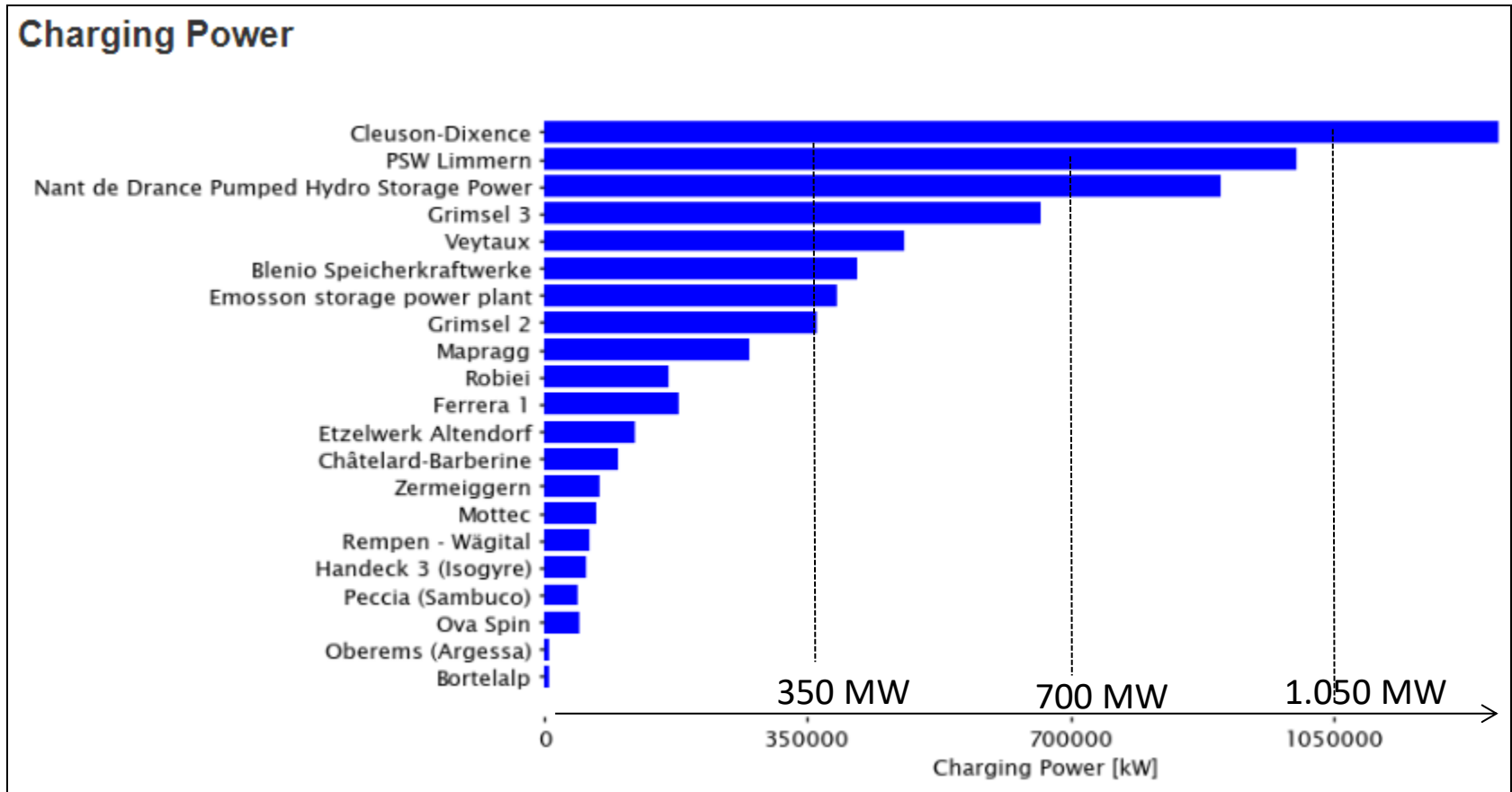
4.3 Suiça

Projetos na Suiça: Evolução da Matriz Elétrica



4.4 Suíça: Principais Projetos de Usinas Reversíveis

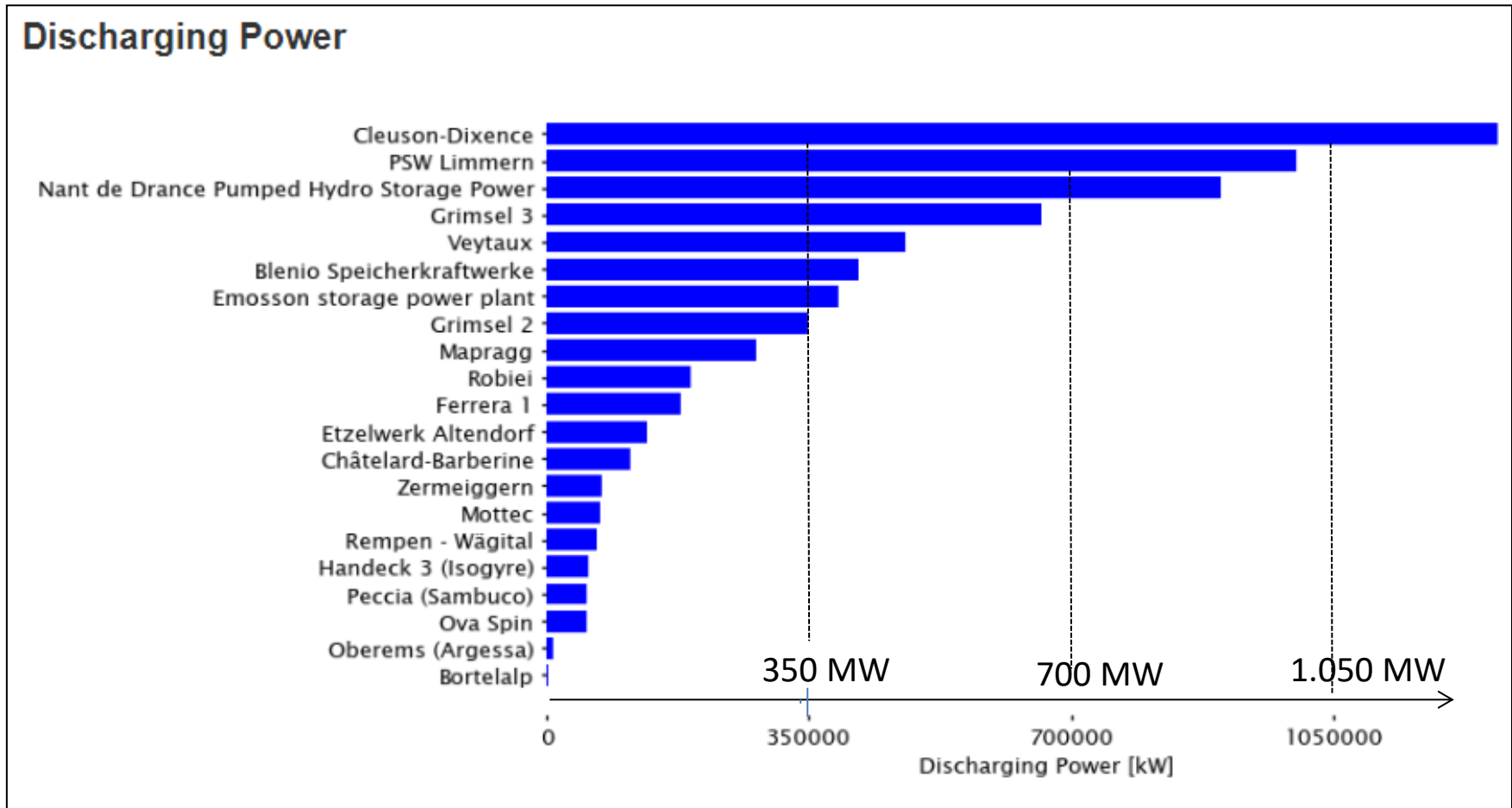
4.3 Suíça Capacidade de Bombeamento (KW) das Usinas Reversíveis



https://energystorageoverview.bfh.ch/database/pumpedhydro_introduction/

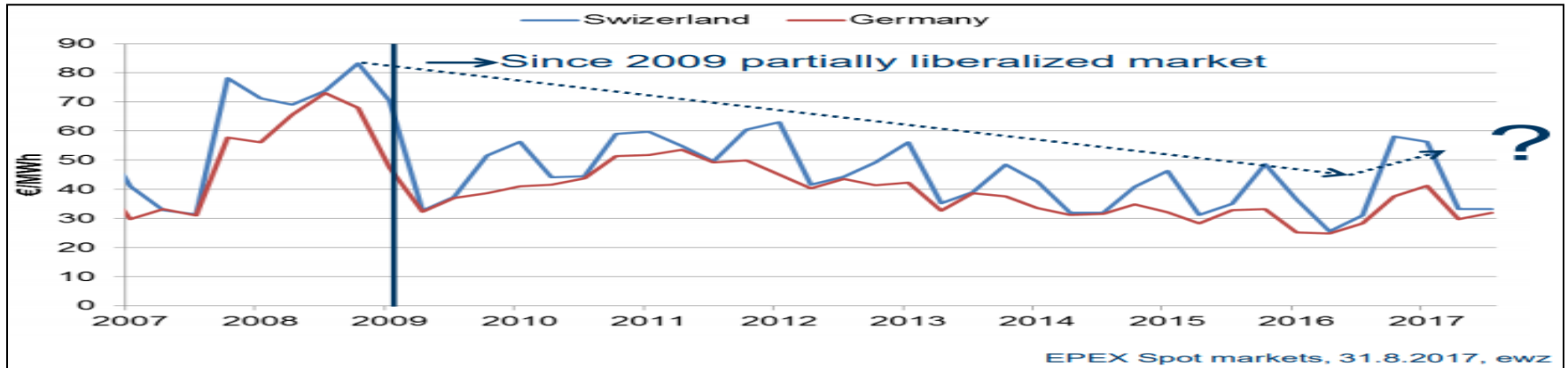
4.4 Suíça -Principais Projetos de Usinas Reversíveis

4.3 Suíça: Capacidade de Turbinamento (KW) das Usinas



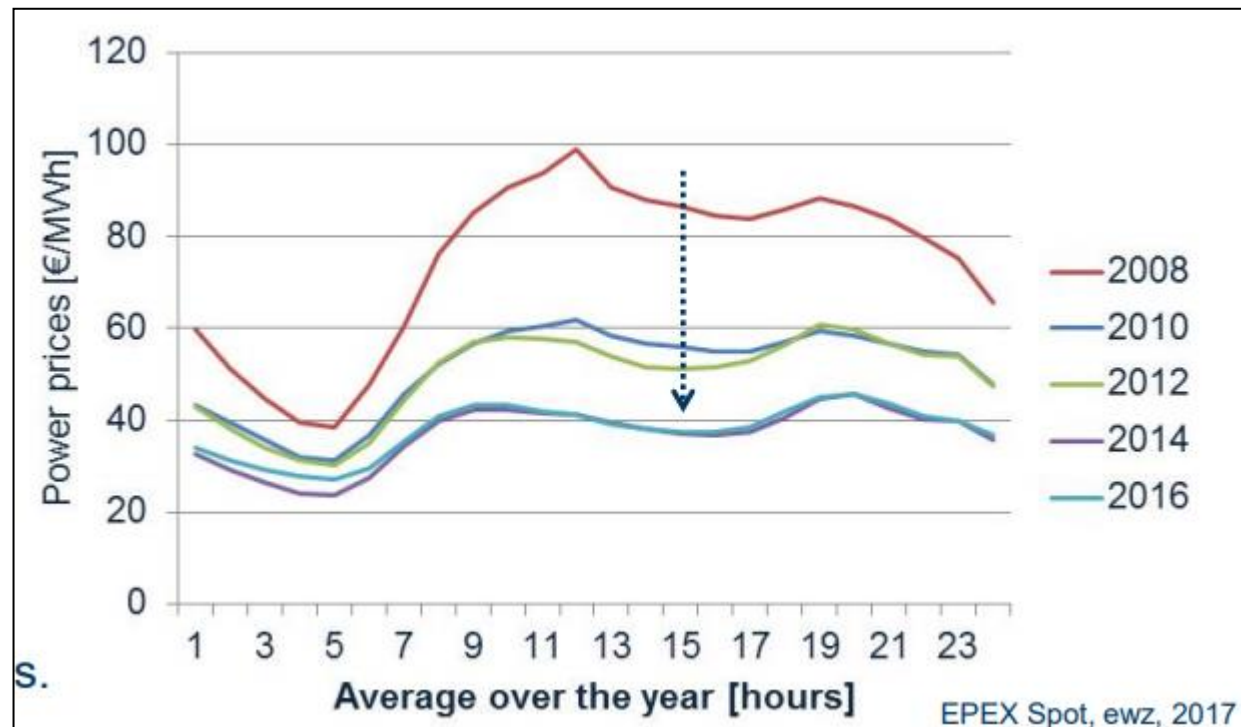
https://energystorageoverview.bfh.ch/database/pumpedhydro_introduction/

4.3 Suíça: Declínio de Preços no Mercado Spot e Redução de Amplitudes Horárias : Menos margem para Arbitragem das Reversíveis (UHR)



Desafios:

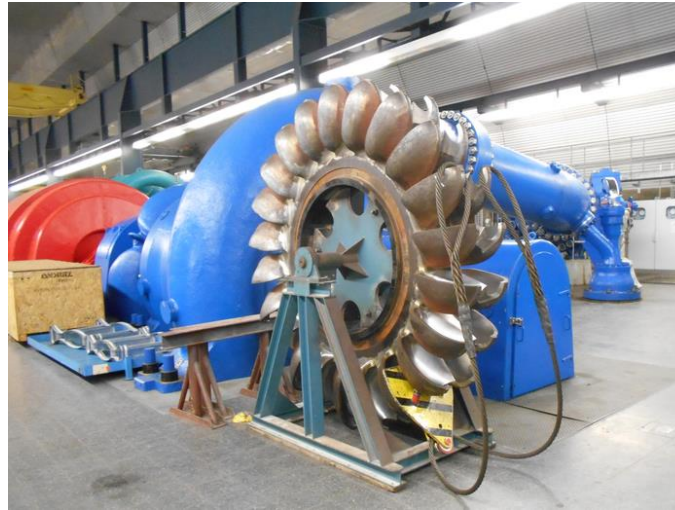
Nova regulação
Para UHEs e UHR—
em discussão,
Pois a Suíça considera
Hydropower as a
Critical Asset



4.3 Suíça: Veytaux pumped storage plant



Lago Superior: Hongrin dam



Queda $H = 880$ m
Vazão Turbinada:
32 m³/s

Custo: USD 337 million

Pelton turbine with spare wheel at Veytaux

Expansão (a partir de 2017)

Dois novos grupos de 120 MW

Cada qual, consistindo de 2 turbinas

Pelton e 2 bombas

Total (a partir de 2017)

480 MW

Sendo 420 MW em operação e 60 MW em reserva



Reverse pump at the
Veytaux pump storage installation

<https://iecetech.org/issue/2017-07/Expanded-pumped-storage-power-station-goes-into-service>

4.3 Suíça: UHR Limmern

Charging Power	1'000'000.00 kW	Main Data Installed capacity: 4 x 250 MW (Rotação Variável) Design discharge: 190 m ³ /s Gros head: 560 - 724 m
Discharging Power	1'000'000.00 kW	
Total Energy Per Year	4'000.00 MWh	
Operational since	2017	
Location	Glarus	

Construction and Design period

Final Design, 2007–2009
Application Design 2009–2017

Construction costs

CHF 2'100 Mio.

Obs. A capacidade de Linth-Limmern (Linthal) é 1480 MW

A usina reversível existente até 2015 (Linth) já tinha 480 MW

Vídeo do Projeto e Construção:

Trading: <https://www.axpo.com/axpo/ch/en/landing-pages/psw-limmern.html>

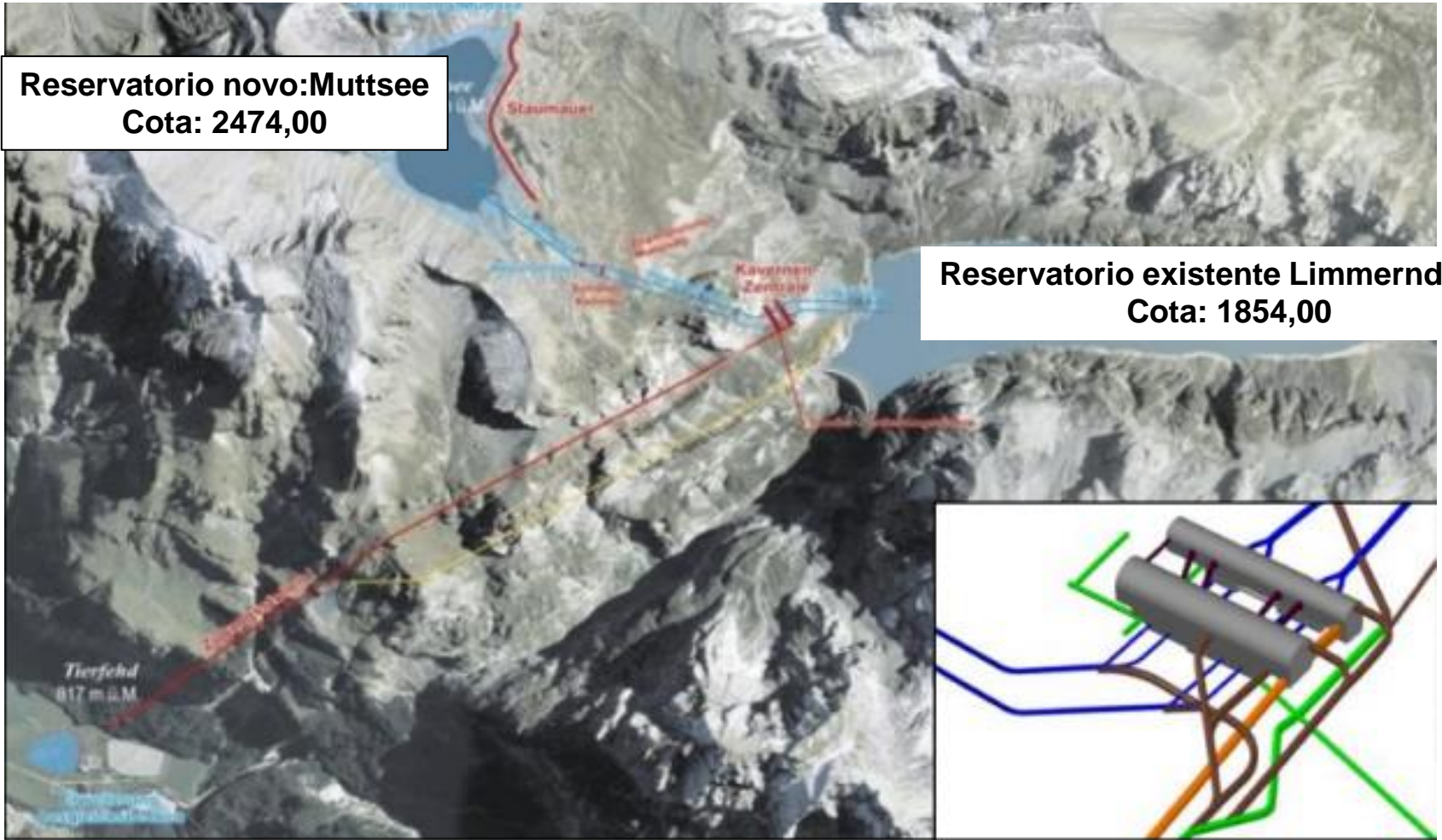
Limmern pumped-storage power plant

Trading: <https://www.axpo.com/axpo/ch/de/landing-pages/psw-limmern.html>

Suiça: UHR Limmern

Reservatorio novo: Muttsee
Cota: 2474,00

Reservatorio existente Limmerndoden
Cota: 1854,00



General overview of Limmern Pump Storage Power Plant, 3D-Layout of Powerhouse Cavern

4.3 Suíça Nant de Drance

Período de Execução: 2006-2018

Testes: 2019

Comissionamento previsto: 2020

(expansão de uhe existente)

Custo: 1,6 bilhões de Euros



Dados Técnicos:

- **6 turbinas Pelton e 6 bombas: 6 de 150 MW**
- **(rotação variável)**
- **Queda: $H_{max} = 395$ m $H_{min} = 250$ m**
- **Produção Anual: 2,5 TWh**
- **Maxima vazão turbinada: 2 x 180 m³/s**

Site da Usina: <https://www.nant-de-drance.ch/accueil/>

Fonte: <http://www.engineersjournal.ie/2018/03/20/nant-de-drance-hydropower-scheme-brief-overview-civil-works/>

4.3 Suiça

Nant de Drance

Réservoir de Vieux Emosson (houve alteamento de 21 m, dobrando seu volume)

Niveau max. 2205.00 NM

Réservoir d'Emosson

Niveau max. 1930.00 NM

Niveau min. 2180.00 NM

$\Delta H = 250 \text{ m}$

$\Delta H = 375 \text{ m}$

Puits vertical

1695 NM*

Galerie d'accès et de la ventilation

Galerie d'amenée

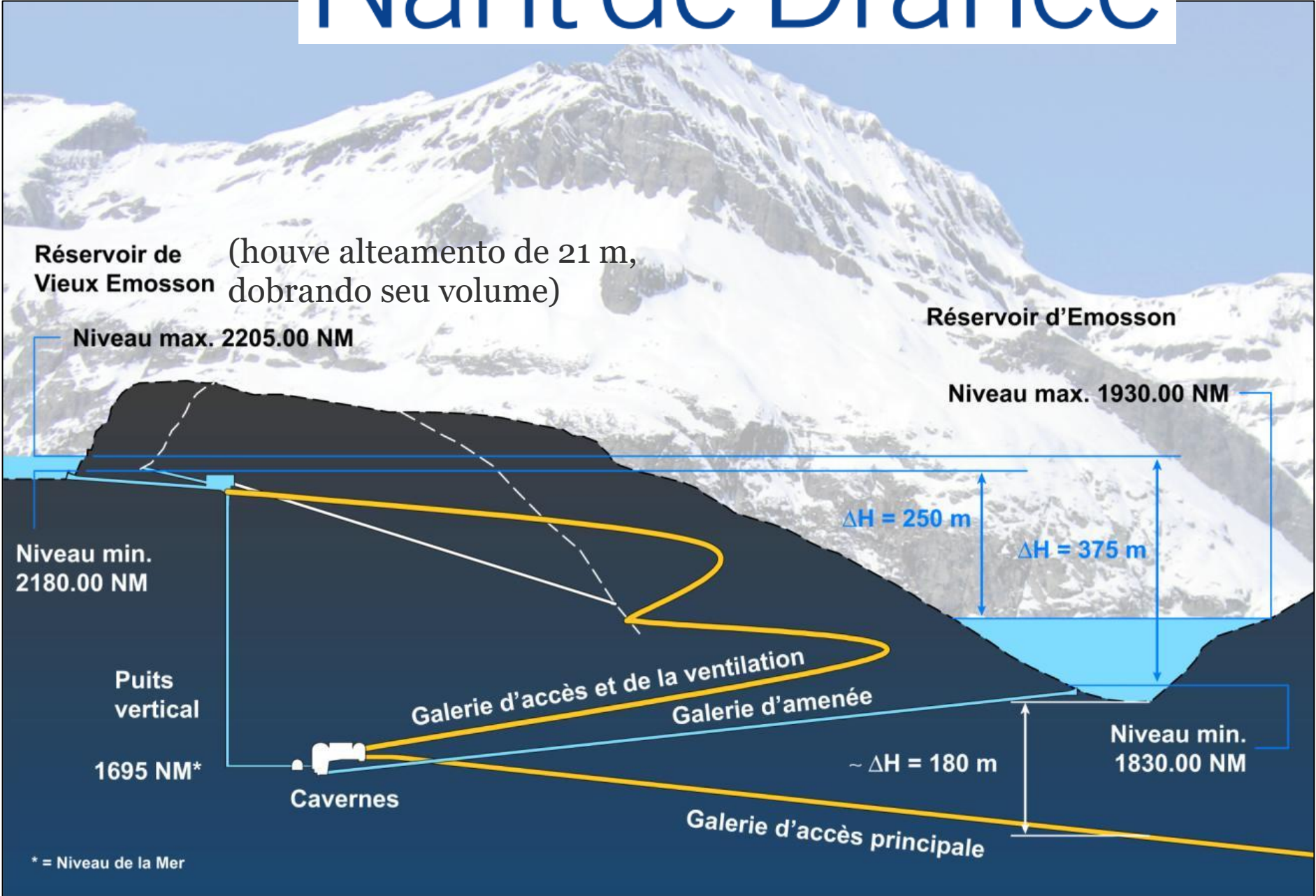
$\sim \Delta H = 180 \text{ m}$

Niveau min. 1830.00 NM

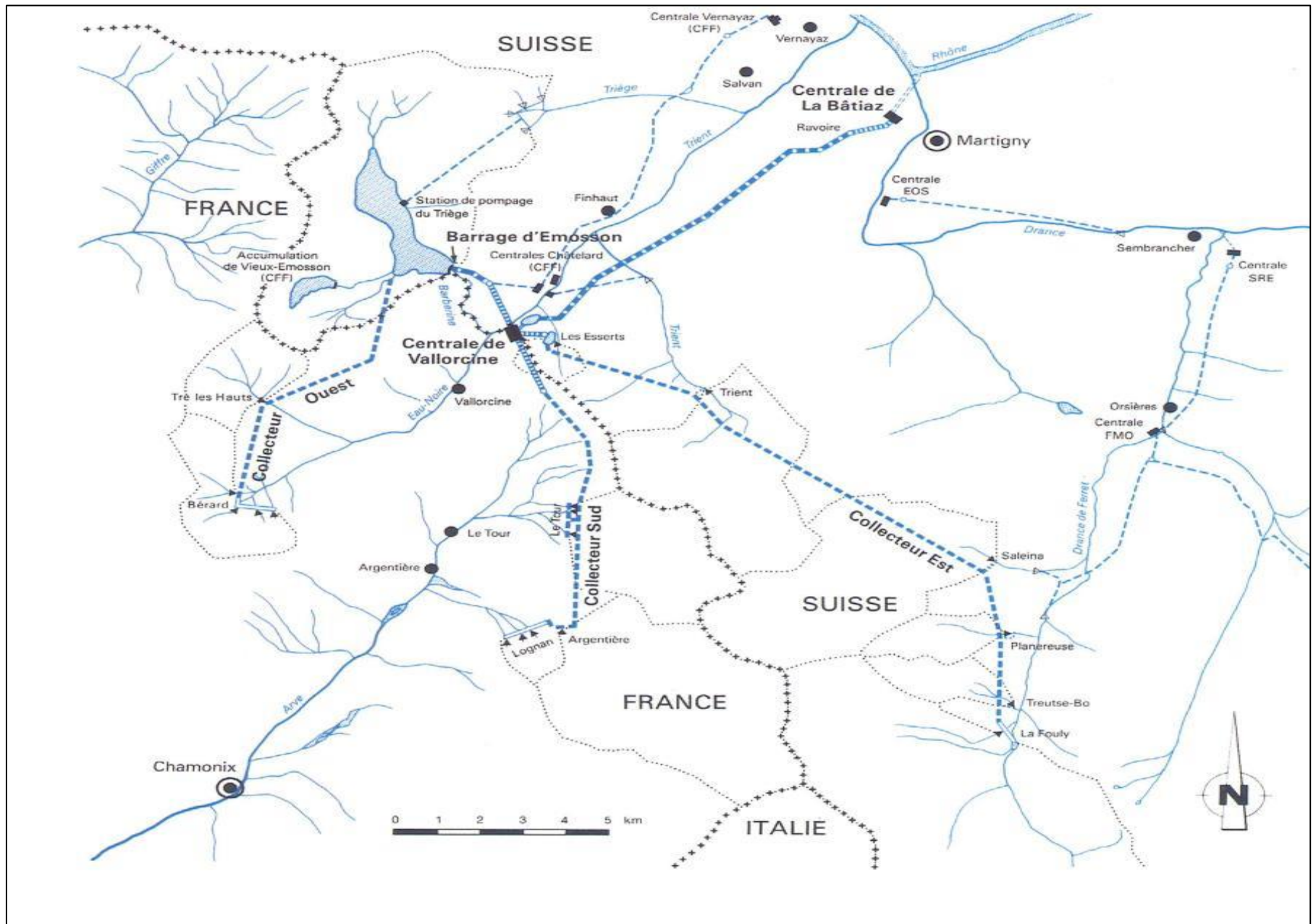
Cavernes

Galerie d'accès principale

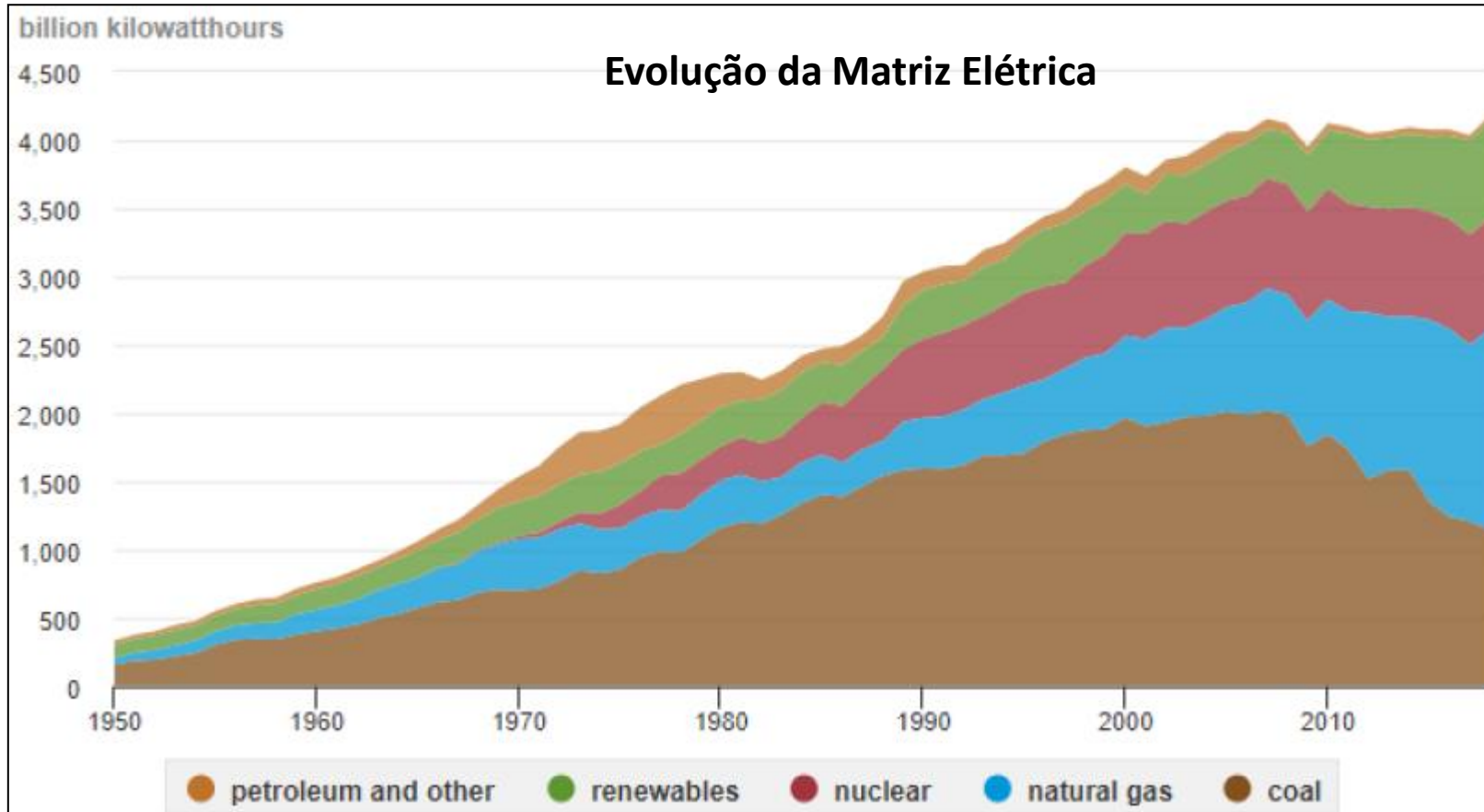
* = Niveau de la Mer



4.3 Suiça Nant de Drance



4.4 UHRs nos Estados Unidos da América



4.4 Estados Unidos da América

Evolução das UHRs

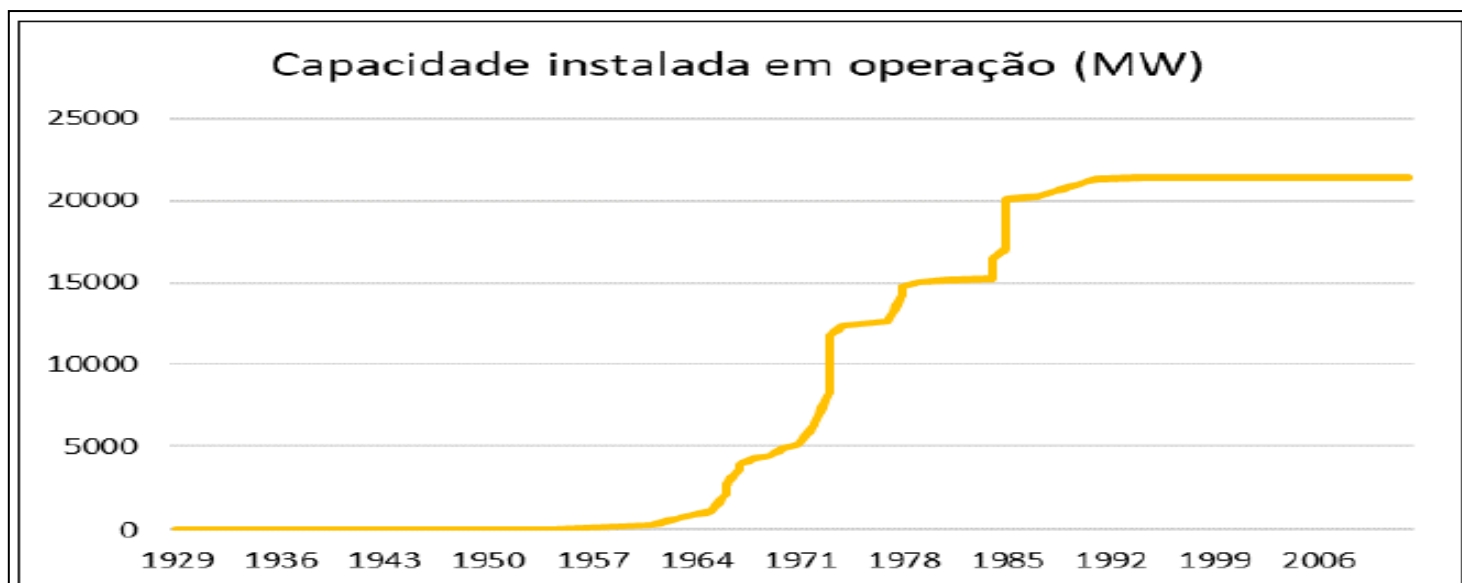


Figura 5.2 - Evolução da capacidade instalada de UHRs nos EUA

Tabela 1 - Fases históricas das construções de UHRs nos EUA	
1929	Primeira UHR dos EUA (29 MW)
De 1952 a 1995	Construção de 37 UHRs (22.612 MW)
A partir de 2012	1 UHR comissionada (40 MW)
	16 UHRs anunciadas (8.985 MW)

4.4 UHR nos Estados Unidos da América

Tabela 2 - Tipos de tecnologia das UHRs nos EUA.

	Construídas	Anunciadas
Sistema de bombeamento/turbinamento	Todas utilizam turbina-bomba	Todas utilizam turbina-bomba
Circuito	Todas em circuito aberto	3 em circuito aberto 13 em circuito fechado
Velocidade de rotação	Todas de velocidade fixa	14 de velocidade fixa 2 de velocidade variável



Figura 5.5 - UHR de Bath County

Tabela 4 - Dados técnicos da UHR de Bath County.

Nome	Bath County
Status	Operando desde 1985
Potência de turbinamento	3.003 MW
Potência de bombeamento	2.880 MW
Armazenamento	24.000 MWh
Turbinas-bombas	6 unidades Francis
Queda bruta	385 m
Tipo de circuito	Aberto
Eficiência de ciclo	79%
Velocidade de rotação	Fixa

4.4 UHR nos Estados Unidos da América

UHR Gondendale (estado Washington)



Figura 5.6 - Projeto da UHR de Goldendale.

Tabela 5 - Dados técnicos da UHR de Goldendale.

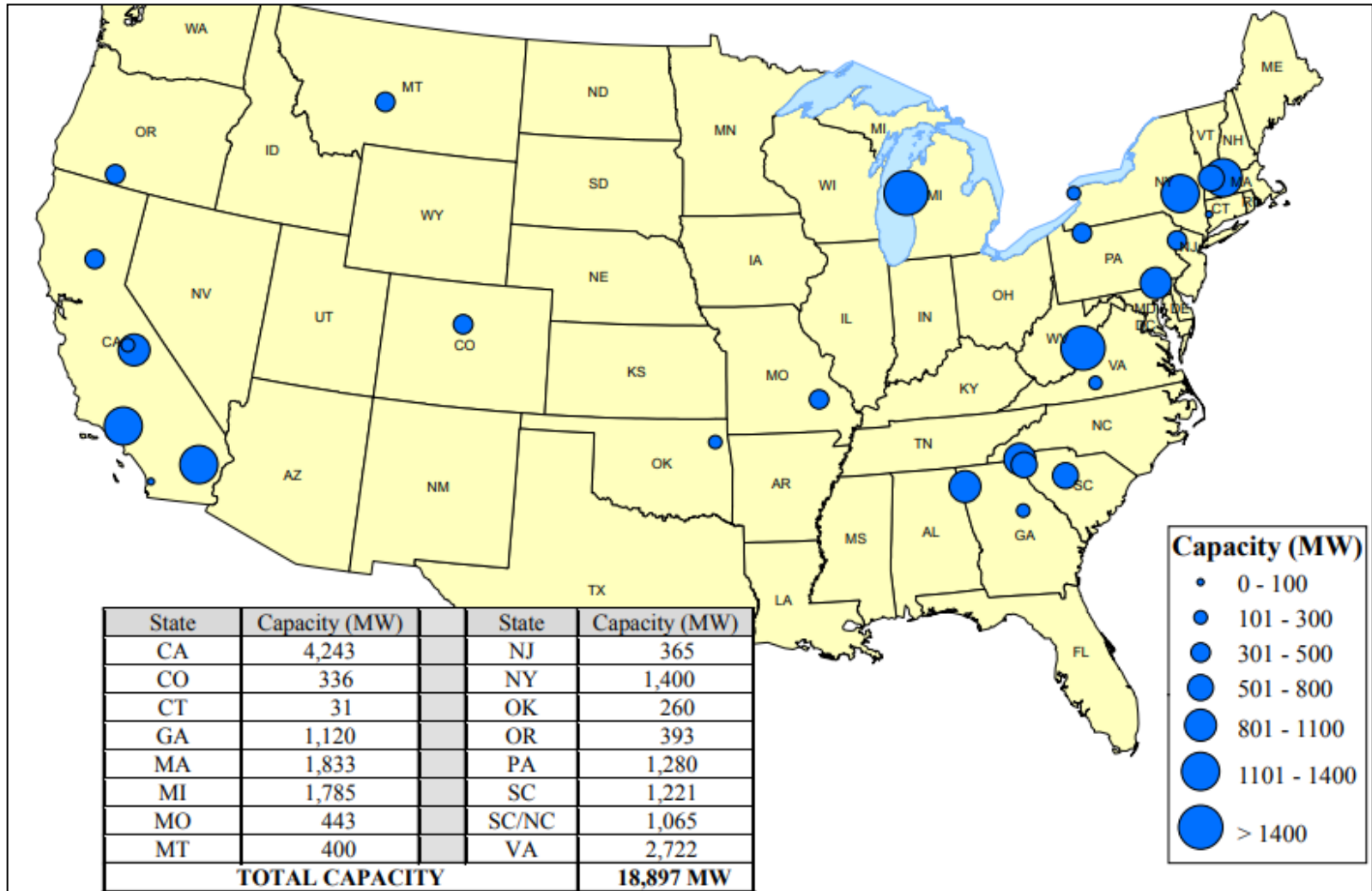
Nome	Goldendale
Status	Emitida licença preliminar
Potência de turbinamento	1.200 MW
Potência de bombeamento	1.200 MW
Armazenamento	14.745 MWh
Turbinas-bombas	3 unidades Francis
Queda bruta	730 m
Tipo de circuito	Fechado
Eficiência de ciclo	80%
Velocidade de rotação	Variável

Goldendale aproveitará infraestrutura construídas para a UHE JD Pool, como rodovias, subestação e L.T.

Fonte de remuneração: serviços ancilares para a região Noroeste dos EUA; mitigar a variabilidade de fontes renováveis, capacidade de rampa adicional (ascendente e descendente), controle de frequência para fontes eólicas, controle automático de geração e suporte para segurança e integridade do sistema (potência reativa e reservas) (FERC, 2019a).

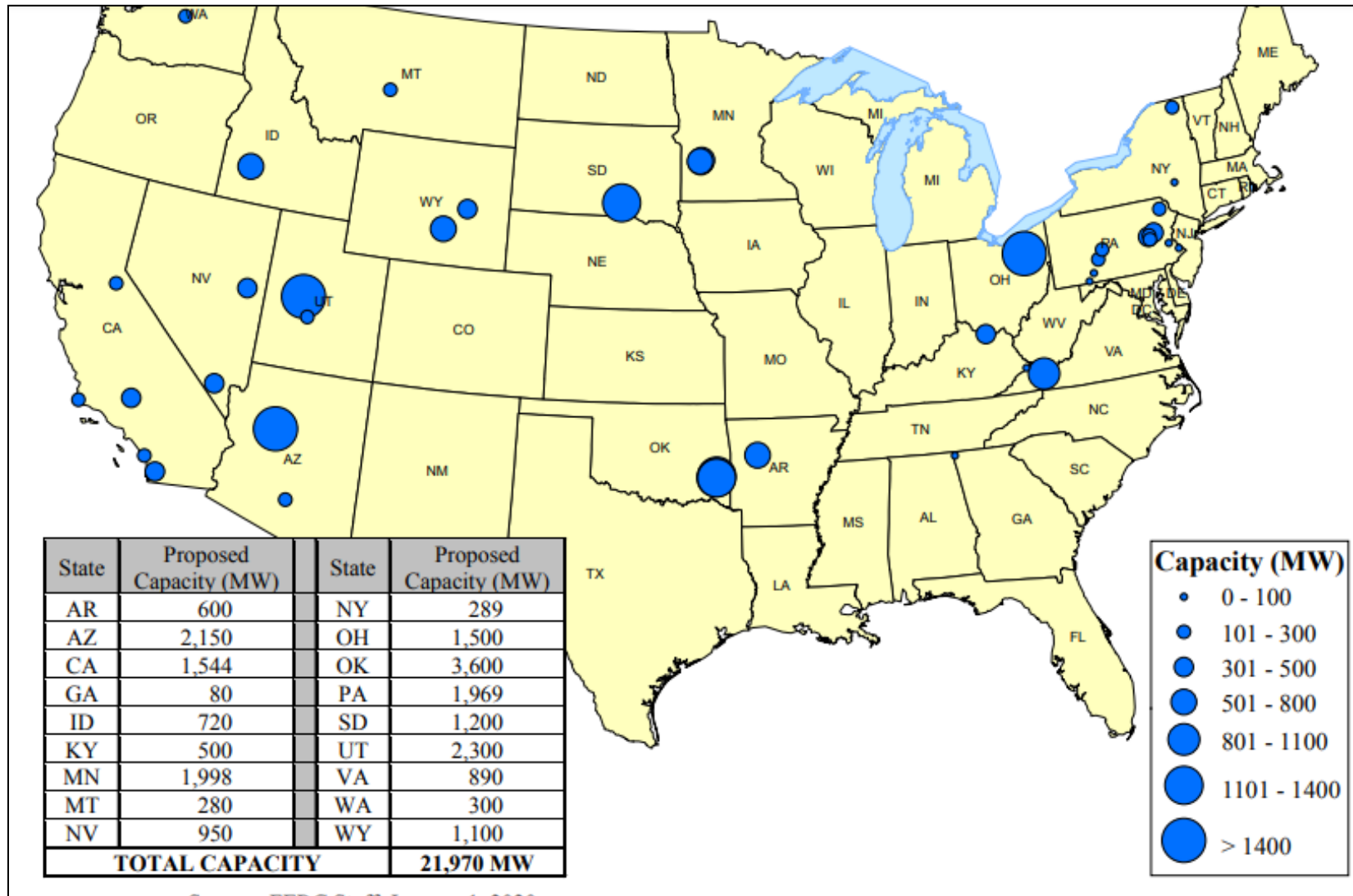
4.4 UHR nos Estados Unidos da América

Projetos de UHR com licença aprovada na FERC



4.4 UHR nos Estados Unidos da América

Projetos de UHR com licença Preliminar* aprovada na FERC

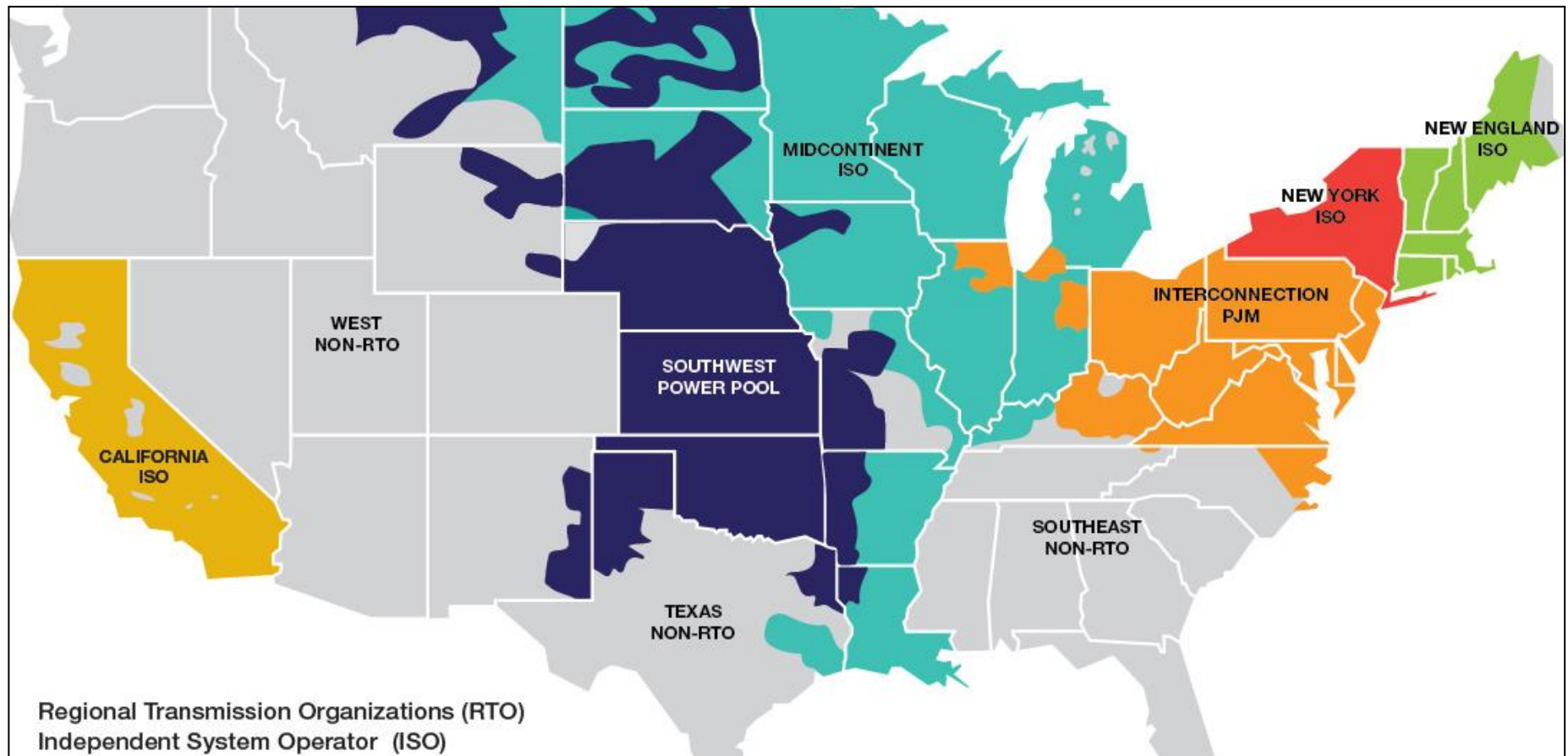


L.Preliminar*: Garante ao empreendedor o direito de prioridade à submissão da Licença Definitiva (Duração: 2 anos)

Fonte: FERC, Jan. 2020

4.4 UHR nos Estados Unidos da América

Operadores Regionais de Sistemas e de Mercados nos EUA



4.4 UHR nos Estados Unidos da América

O mercado e sistema PJM (originamente: Pensilv.; N. Jersey, Maryland)

O PJM é um organização regional de transmissão (RTO) que opera no mercado de 13 estados dos EUA (Delaware, Illinois, Indiana, Kentucky, Maryland, Michigan, New Jersey, North Carolina, Ohio, Pennsylvania, Tennessee, Virginia, West Virginia) e distrito de Columbia (que sedia a cidade de Washington), atendendo cerca de 65 milhões de habitantes.

Os dados mais relevantes sobre o mercado do PJM são:

- Capacidade instalada: 180 GW
- Demanda máxima simultânea: 165,49 GW
- Extensão da linha de transmissão: 84.236 milhas
- Energia anual transacionada: 806.546 GWh
- Receita anual bruta das transações: U\$ 49,8 bilhões

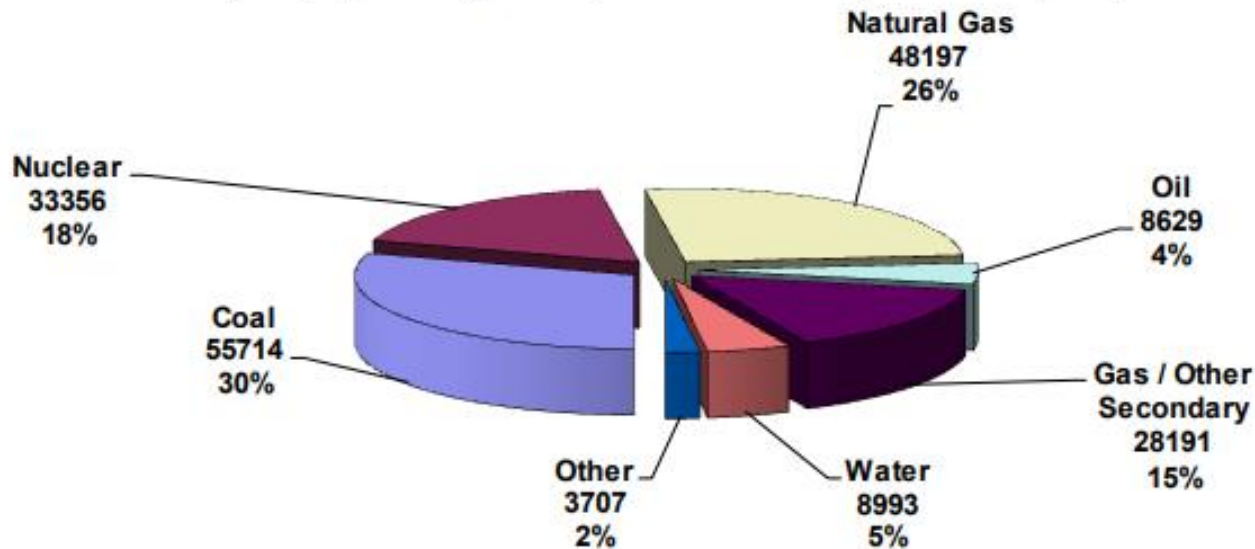
4.4 UHR nos Estados Unidos da América

O mercado e sistema PJM (originamente: Pensilv.; N. Jersey, Maryland)

PJM RTO

(MidAtlantic, AP, ComEd, AEP, Dayton, Duquesne, Dominion, ATSI, DukeOK & EKPC Regions)

Capacity By Fuel Type – 186,788 MW installed generation capacity



Effective 6/1/2019

Os recursos de **Storage** incluem:

- UHR: 5.000 MW
- Térmicas (water heaters): 90 MW
- Volantes de inercia (fly wheels): 20 MW
- Baterias: 300 MW (dos quais 150 MW conectados à transmissão, e 150 MW forma de recursos distribuídos no grid)

4.4 UHR nos Estados Unidos da América

O mercado e sistema PJM (originamente: Pensilv.; N. Jersey, Maryland)

- As UHRs participam regularmente dos mercados de energia (Day-ahead, intra-day), de capacidade e de provisão de serviços ancilares.
- Não existe uma priorização de despacho para as UHRs em detrimento de outras fontes rápidas (UHEs ou plantas de gás natural). ***O despacho é controlado por ordem de mérito***, conforme as ofertas nos mercados.
- O atributo da resposta rápida das UHRs é muito útil para os operadores do PJM para mitigar o efeito da geração intermitente no grid
- De forma geral, não há regras específicas para as UHRs:

O despacho é totalmente derivado das ofertas nos mercados.

A notificação prévia é exigida apenas para operações não-usuais de grandes unidades de UHRs. Não obstante, os equipamentos de Controle Automático de Geração (CAG) são requeridos para operar no PJM.

5. CONCLUSÕES

- As UHRs vêm sendo consideradas muito importantes em seus atributos (flexibilidade, resposta rápida, serviços ancilares) no grid, nos diversos países e regiões – incluindo aqueles com presença hidrelétrica
- Tecnologia provada e duradoura (1 só descomissionada ?)
- Melhor recurso de Macro Energy Storage
- Estará na agenda dos países em Transição Energética sob Expansão das Renováveis e GD
- UHRs não são expostas ao ***Risco Hidrológico***, com são as UHEs
- O Brasil tem oportunidade estratégica de colocar as UHRs em seu planejamento energético

**Muito Obrigado
pela Atenção**

Paulo Barbosa
franco.barbosa@gmail.com