

RE/GPH/32

V SEMINÁRIO NACIONAL DE
PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GRUPO I

PRODUÇÃO HIDRÁULICA

(G P H)

O PAPEL FUTURO
DA ACUMULAÇÃO BOMBEADA NO BRASIL

Wilson Jordão Filho
INTERNACIONAL DE ENGENHARIA S.A.

RECIFE - PE - BRASIL

1 9 7 9

RESUMO

Neste trabalho são apresentadas as perspectivas promissoras de desenvolvimento do potencial hidrelétrico no país, sob a forma de Acumulação Bombeada, e em particular para a região Nordeste e a região Sudeste.

Ênfase especial é dada ao fato das possibilidades de aproveitamentos de acumulação bombeada no Brasil serem extremamente promissoras.

Desenvolvem-se conceitualmente as idéias sobre acumulações bombeadas diárias/semanais e sazonais/plurianuais, a utilização das mesmas integradas a um sistema hidrelétrico convencional, e a liberação do uso da água para finalidades múltiplas.

Descrevem-se resumidamente, as principais vantagens para um sistema gerador, de ser dotado em certo grau de aproveitamentos de acumulação bombeada, e estabelecem-se as faixas prováveis de competitividade dos mesmos com outras alternativas de suprimento de energia.

São apresentados, para ilustração, casos correntes de aproveitamentos estudados pelo autor, os quais testemunham a grande economicidade e atrativo dos mesmos.

Ao final, recomenda-se a rápida agilização do planejamento hidroenergético para preparar as consciências dos técnicos e montar a infra-estrutura requerida para o desenvolvimento dos primeiros aproveitamentos de acumulação bombeada.

1. INTRODUÇÃO

Países com altos ritmos de crescimento energético estão gradualmente se voltando para a procura de novas fontes de produção de energia elétrica sob forma descontínua.

Entre as diversas alternativas para atendimento descontínuo à carga de um sistema, destacam-se as acumulações bombeadas, as turbinas a gás, e as usinas termoelétricas e hidrelétricas de ponta, que apresentam diferentes características nos seus aspectos técnicos e econômicos. Na maioria dos casos, é a otimização do seu uso simultâneo que deve ser pesquisada para a cobertura de um diagrama de carga, cotejando-se a vantagem de serem complementares em certo grau com a desvantagem de serem competitivas dentro de certos limites.

Nos dois últimos decênios, a acumulação bombeada começou a se revelar uma forma economicamente atrativa de produção de energia em sistemas de grande porte, sendo adotada na maioria dos países mais desenvolvidos.

O Brasil marcha aceleradamente no crescimento das suas necessidades de consumo de energia elétrica, e ao mesmo tempo, diversifica as suas fontes de produção com planos de incorporação de novas capacidades, inclusive, de origem térmica. Apesar do seu sistema de geração ter peculiaridades próprias, vai assim se aproximando das mesmas situações conjunturais que levaram historicamente os países mais desenvolvidos a optarem pelo início da implantação de usinas de acumulação bombeada.

Por esta razão, começa a se tornar oportuno o debate e a troca de idéias, para o início das gestões voltadas para aproveitamentos desta natureza, já que entre a conscientização geral, a implantação de medidas de base e a construção dos primeiros aproveitamentos, decorrerão, no mínimo, 10 anos.

O desencadeamento de atividades na área de aproveitamentos de acumulação bombeada representaria um notável desafio à engenharia brasileira, ligada à geração e à transmissão de energia

elétrica, em especial às engenharias civil, mecânica, elétrica e de sistemas.

Elas teriam que se equipar com recursos físicos e humanos para projetar, construir, montar e operar usinas hidrelétricas não convencionais, absorvendo um "know how" que já forma um pacote de conhecimentos acumulados nos últimos 15 anos pelos países mais desenvolvidos.

2. ASPECTOS CONCEITUAIS

2.1 Generalidades

Uma instalação de acumulação bombeada é, basicamente, a combinação de uma usina hidrelétrica com uma estação de bombeamento. Compreende a acumulação bombeada de água num reservatório superior por bombeamento, a partir de um reservatório inferior, com energia disponível a custo marginal, parte da qual é devolvida ao sistema a preço mais elevado, através de turbinagem, para satisfação de demandas descontínuas, geralmente na forma de energia e capacidade de ponta, cujo preço de venda mais elevado compensa as perdas do ciclo bombeamento/turbinagem.

Acumulações bombeadas têm sido concebidas com instalações utilizando desde 2 (duas) até 4 (quatro) máquinas (turbina, bomba, alternador e motor), tendo-se revelado como mais atrativa a concepção em duas máquinas (turbina-bomba, alternador-motor), a qual tornou comum a denominação "Usinas Reversíveis" (UR).

Estas, estão com o seu mercado em franca expansão, face ao rápido progresso tecnológico no aumento do limite superior das quedas comercializáveis para turbina-bomba de um estágio que, presentemente, estão na faixa de 600 a 700 m.

As acumulações bombeadas trazem no seu bojo uma série de vantagens sobre as outras alternativas referidas, tais como:

- menos interferência no meio ambiente.
- possibilidades de uso de água para outras finalidades.
- maior confiabilidade operacional do sistema pela rapidez de resposta às solicitações da rede.
- integração mais ampla de sistemas de energia com sistemas de aproveitamento de recursos hídricos.
- melhor aproveitamento da capacidade de linhas de transmissão existentes pela redução na amplitude da variação de carga nas linhas (alimentação da UR fora do pique e satisfação do pique com a UR).
- fonte econômica de energia reactiva conseguida pela regulação de voltagem dada pelos geradores da UR sincronizados sobre a linha e próximos do centro de recepção.
- reserva de potência para atendimento de falhas inesperadas do sistema de geração e transmissão.

Elas estão se tornando um componente normal de sistemas hidrotérmicos de geração de energia elétrica.

De uma maneira geral, em sistemas em que a capacidade das usinas térmicas representa uma grande parte do sistema, acumulações bombeadas de "curto" ciclo de operação são as mais viáveis, onde a água é bombeada durante a noite e durante o fim de semana, com energia térmica excedente, e a mesma água é utilizada para gerar energia durante horas de alta demanda dos dias úteis (acumulação bombeada do tipo diário/semanal).

Em sistemas hidrotérmicos em que a capacidade das usinas hidráulicas representa a maior parte do sistema gerador, acumulações bombeadas de "longo" ciclo de operação podem também ser viáveis, onde a água é bombeada durante estações e anos úmidos, usando energia excedente, e a mesma água é utilizada para gerar energia e prover capacidade durante estações e anos secos, quando ocorre decréscimo nas reservas potenciais sob forma convencional (acumulação bombeada do tipo sazonal/plurianual).

As definições anteriores são algo teóricas, pois, na prática, podem ocorrer combinações diversas de curtos e longos ciclos de operação em formas bastante complexas e sofisticadas de produção de energia. Por exemplo, uma perspectiva atraente pode ser a inclusão de uma usina de ciclo diário/semanal de operação horária descontínua, porém, permanente (todos os dias de todos os anos), em um esquema de usina plurianual, reduzindo o custo de uma capacidade ociosa reservada para uso apenas em épocas de estiagem mais severa. As usinas combinando ciclo diário/semanal com sazonal/plurianual podem levar a concepções mais econômicas e versáteis dos aproveitamentos, por requererem volumes acumulados muito menores para grandes potências instaladas, pela utilização de componentes comuns (barragem, reservatório, adução, etc.) e pela flexibilidade para atendimento de diversas variações na carga de um sistema.

Em certos casos, usinas reversíveis de curto ciclo de operação podem ser uma solução interessante para a provisão de energia de ponta, mesmo em sistemas hidrotérmicos com preponderância de usinas hidrelétricas (caso brasileiro). Quando as usinas reversíveis estão situadas perto dos grandes centros de consumo de energia e as usinas hidrelétricas convencionais distantes de tais centros, transmissão de ponta a partir de linhas muito longas, a construção de novas usinas de ponta ou mesmo a instalação adicional de novas turbinas nas usinas hidrelétricas convencionais (supermotorização) podem ter custos não competitivos quando comparadas com os mesmos custos de uma usina reversível. Além disso, tal instalação de maior número de turbinas para produzir energia de ponta, frequentemente envolve perdas de energia derivadas do aumento do nível d'água à jusante do canal de fuga, e diversos problemas no sistema de transmissão, normalmente indesejáveis e inconvenientes. Outrossim, no Brasil, algumas alternativas para satisfazer demandas de ponta, como turbinas a gás e usinas térmicas convencionais (a óleo), implicariam, não apenas no uso de combustível importado de alto custo, mas também em menor

flexibilidade e segurança de operação, sendo de regra a sua viabilização possível apenas para pequenas complementações do sistema em caráter de ciclo diário, ou para formar a sua capacidade de reserva.

Com relação às possibilidades de intercâmbio energético entre sistemas geradores de base predominantemente hidráulica, tirando-se partido de defasagens entre regimes hidrológicos, é interessante ressaltar que, numa primeira análise, poder-se-ia contestar o desenvolvimento a curto prazo de instalações de acumulação bombeada, pela oportunidade de se colocar com razoável nível de confiabilidade, uma parcela de energia secundária excedente de um sistema (seja aquele perdido pelos vertedores, seja aquele não utilizado pela falta de mercado), como energia primária em um sistema vizinho.

Ocorre que as diversas razões de ordem técnica e econômica podem contrariar esta afirmação, entre elas: distância de transmissão, compatibilidade de porte e nível de desenvolvimento entre os dois sistemas, valor da parcela de energia que é economicamente transferível, possibilidade de revenda de energia comprada no período sazonal com regime hidrológico inverso, etc.

Aproveitamentos hídricos com acumulação bombeada podem ter como objetivos, além da geração de energia, o fornecimento de água para os usos municipais e/ou industriais, a provisão de água para irrigação e o aumento de vazões. Frequentemente, os aproveitamentos hídricos com acumulação bombeada são de múltiplas finalidades. Em alguns casos, um projeto hidrelétrico com usina reversível é modificado para fornecer água para os outros fins, ou um projeto hidráulico com fins não hidrelétricos é modificado para incluir usinas reversíveis.

Além disso, os reservatórios dos aproveitamentos de acumulação bombeada de longo ciclo podem ter ainda outras finalidades secundárias, tais como: recreação, controle de poluição e preservação e/ou valorização do meio ambiente.

Com relação às acumulações bombeadas de curto ciclo, elas tem, em geral, menores perspectivas para uso da água para fins múltiplos, pelo pequeno porte das reservas de águas armazenadas, localizadas, na maioria dos casos, em áreas de drenagem com contribuição de vazão local desprezível.

Para esta última modalidade, sobressai em importância, a minimização das perdas de água, se o sistema de reservatórios trabalha em ciclo fechado (sem contribuição hídrica local), e a concepção de como proceder o seu enchimento, pela sua ligação com sistemas hídricos existentes.

2.2 Classificação

Na fase de planejamento e concepção, é importante se tirar partido de todas as possibilidades que uma região pode oferecer, para que se formulem as combinações mais vantajosas de hidrogeração que levem às melhores relações benefício-custo. Esta situação só pode ser atingida com o conhecimento pleno de todas as nuances que podem compor uma estratégia global para o planejamento hidroenergético.

Esta estratégia se baseia na pesquisa para se atingir, sob todas as formas possíveis, a exaustão do potencial das bacias hidrográficas dentro de um nível de economicidade pré-estabelecido.

Um exemplo de uma estratégia global considerado válido para o Brasil é apresentado na TABELA 2.2-1.

Nesta tabela, observam-se as situações onde os aproveitamentos de acumulação bombeada podem ser vislumbrados, a saber: em acumulações bombeadas isoladas; em esquemas combinados e em substituição de usinas convencionais existentes.

As combinações mais vantajosas podem envolver, inclusive, acoplamento de unidades convencionais com reversíveis, substituição de unidades velhas, interligação entre usinas e/ou reservatórios que são referidos mais adiante (Complexo Hidrelétrico de Fumaça).

Um aproveitamento de acumulação bombeada pode ser concebido e classificado de diversas maneiras, sobressaindo o tipo de conjunto eletromecânico, a forma de operação e a disposição física do sistema de geração, que por esta razão, são apresentados na TABELA 2.2-1.

2.2.1 Tipos de Conjuntos Eletromecânicos

Nas usinas de acumulação bombeada existem três modalidades clássicas de equipamentos: os sistemas a duas máquinas (turbina-bomba e motor-gerador); três máquinas (turbina, bomba e motor-gerador) e quatro máquinas (turbina, bomba, motor e gerador).

Foi a primeira modalidade que deu grande impulso aos aproveitamentos de acumulação bombeada pelo barateamento de custos propiciado pelo desenvolvimento tecnológico dos chamados grupos reversíveis.

Estes grupos, atualmente, já atendem com segurança a operação em quedas de até 550 m, e excepcionalmente, ainda em caráter experimental, até 650 m, e potências unitárias de até 400 MW, conforme se vê na ILUSTRAÇÃO 2.2.1-1. Nesta observam-se as limitações impostas por quatro condições restritivas ligadas aos gabaritos de transporte e exigência de fabricação, velocidade de rotação e características mecânicas, dinâmica de queda, características mecânicas e elétricas do gerador-motor. As usinas de Fumaça e Pacatuba estudadas pelo autor são apresentadas para ilustração junto com as usinas internacionais mais proeminentes.

2.2.2 Formas de Operação

As diversas formas de operação das usinas reversíveis são apresentadas resumidamente a seguir, com as ilustrações de sua função na cobertura dos diagramas de carga. (Ver ILUSTRAÇÕES 2.2.2-1, 2.2.2-2, 2.2.2-3 e 2.2.2-4).

As usinas reversíveis, sob o aspecto operacional, podem ser a grosso modo, subdivididas em quatro categorias distintas, apresentadas a seguir:

<u>Usina Reversível de Ciclo Pluri-anual</u>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">bombaia (consome)</div> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">turbina (gera)</div> </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">com energia secundária anualmente excedente no sistema de origem hidráulica.</div> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">energia primária nos anos de estiagem contínua, cobrindo um período crítico plurianual.</div> </div>
<u>Usina Reversível de Ciclo Sazonal</u>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">bombaia (consome)</div> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">turbina (gera)</div> </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">com energia secundária excedente de origem hidráulica ou térmica no sistema, todos os anos no período de chuvas.</div> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">energia primária todos os anos (contínua por diversos meses, no período de estiagem inter-anual).</div> </div>
<u>Usina Reversível de Ciclo Semanal</u>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">bombaia (consome)</div> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">turbina (gera)</div> </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">com energia secundária excedente no sistema, nos fins de semana.</div> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">energia primária de ponta (contínua durante algumas horas do dia ou todo o dia, de segunda a sexta-feira).</div> </div>
<u>Usina Reversível de Ciclo Diário</u>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">bombaia (consome)</div> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">turbina (gera)</div> </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">com energia secundária excedente no sistema de origem hidráulica ou térmica, nas horas de menor demanda diária.</div> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; padding: 0 10px;">energia primária para atender pontas no sistema (contínua durante algumas horas por dia, no período de piques na demanda).</div> </div>

A ILUSTRAÇÃO 2.2.2-1 apresenta duas curvas de carga com e sem acumulação bombeada, mostrando o papel da acumulação bombeada diária em um sistema hidrotérmico, observando-se a cobertura ao único pique do dia, e recuperação para bombeamento na madrugada.

A ILUSTRAÇÃO 2.2.2-2 apresenta o uso de uma acumulação bombeada diária/semanal, observando a cobertura aos dois picos do dia, e a recuperação por bombeamento nas madrugadas e nos fins de semana.

A ILUSTRAÇÃO 2.2.2-3 apresenta uma curva de duração de carga com e sem o uso de acumulação bombeada de curto ciclo (diária e/ou semanal).

Finalmente, a ILUSTRAÇÃO 2.2.2-4 apresenta a operação de uma acumulação bombeada sazonal/diária, no período de estiagem e em parte do período úmido.

Estas modalidades na prática, costumam aparecer combinadas, principalmente as formas diária/semanal e diária/sazonal ou plurianual.

A acumulação bombeada sazonal pouco difundida no Brasil, pode apresentar uma série de vantagens e opções, conforme ilustra o QUADRO 2.2.2-1.

2.2.3 Disposição Física do Sistema de Geração

Os sistemas de geração em usinas de acumulação bombeada do tipo reversível, apresentam a disposição física de casa de força na forma de usinas subterrâneas, mistas (semi-enterradas), ou a céu aberto. (Ver ILUSTRAÇÕES 2.2.3-1, 2.2.3-2 e 2.2.3-3).

Diversos fatores entram em jogo na decisão da escolha de uma dada disposição, mas sobressaem a necessidade de maior ou menor submergência para os grupos, da geologia mais ou menos favorável nos "talus" da montanha junto à tomada d'água inferior e características do perfil geral do sistema de adução e fuga.

Para maiores quedas (acima de 400 m) e altas velocidades específicas, a tendência concentra-se nas usinas subterrâneas, ao passo que para quedas intermediárias ou pequenas, já ocorre um número apreciável de aproveitamentos a céu aberto, ou semi-enterrados, estes últimos aparecendo em soluções mais recentes.

Exemplos de usinas subterrâneas são: Dinorwic, Nummapara, Coo-Trois Ponts; de usinas a céu aberto são: Bath County, Ludington, e semi-enterradas: Vianden X, Rodund II, PFestionig.

A TABELA 2.2.3-1 apresenta ainda alguns parâmetros geométricos e eletromecânicos de diversas usinas.

3. PERSPECTIVAS BRASILEIRAS

3.1 Generalidades

Atualmente, pode-se afirmar que a viabilização da acumulação bombeada é uma fatalidade histórica, seja a evolução de cada nação voltada para concentrar o crescimento da potência instalada na origem hidráulica, ou termonuclear, ou ambas, conforme atestam os exemplos em diversos países (E.U.A., Alemanha, Japão, Espanha, Iugoslávia, Itália, etc.).

No Brasil, a sua dimensão continental, a sua topografia e a ocupação econômica dos espaços, favorece a atratividade destes aproveitamentos em âmbito e perspectivas futuras, tanto ou mais amplas do que a maioria dos países que já se iniciaram nesta nova feição de suas políticas energéticas.

3.2 Região Sudeste

Notadamente junto à costa Sudeste, existem grandes oportunidades para a construção de aproveitamentos hídricos com acumulação bombeada, seja do tipo diário/semanal, seja do tipo sazonal/plurianual combinados ou não, pois a região oferece oportunidades excepcionais para a implantação deste tipo de usina, bem próximos aos grandes centros de consumo.

Com efeito, observa-se que, ao menos nesta região, se verificam as seguintes condições:

1º) Grandes reservas de energia hidráulica excedente ainda não utilizável, cujo aproveitamento pode aumentar a cada nova instalação hidrelétrica ou supermotorização. As novas capacidades incorporadas, no entanto, estarão cada vez mais longe dos grandes centros de consumo, aumentando os custos de transmissão, especialmente para energia de ponta. Estes dois fatores conjuminados favorecem à implantação de usinas de acumulação bombeada.

29) Um programa de centrais nucleares em desenvolvimento e perspectivas de desenvolver em razoável escala, termoelétricas a carvão. Ambas são normalmente construídas para atendimentos à base da demanda, e mantêm uma certa capacidade ociosa variável que pode dar cobertura ao ciclo de bombeamento nas instalações de acumulação bombeada, pela disponibilidade de fornecer a energia necessária a um custo marginal.

39) Razoável número de pequenas e médias bacias, cujo potencial não começou sequer, a ser desenvolvido, por serem consideradas anti-econômicas. O planejamento do desenvolvimento destas pode tornar-se mais atrativo com esquemas mistos, envolvendo usinas convencionais e de acumulação bombeada, permitindo a viabilização de usinas hidrelétricas convencionais, outrora impraticável.

49) Provável tendência de evolução das curvas de carga dos sistemas no sentido de se aproximarem daquelas dos países mais desenvolvidos, onde a acumulação bombeada já se implantou com vantagens econômicas comprovadas sobre outras alternativas.

59) Tendência crescente à necessidade de aproveitamentos de finalidades múltiplas nas áreas mais povoadas, justamente onde a topografia favorece a acumulação bombeada como elementos-chave da transposição de barreiras topográficas.

Dos estudos anteriores, nos quais o autor participou, sobressaem as usinas reversíveis de Fumaça (2000 MW); Guaripu (2000 MW) e Santana (2000 MW), todas no Estado do Rio de Janeiro, três usinas com custos de implantação altamente atrativos.

Em particular, na primeira delas, parece viável a instalação de um autêntico complexo hidrelétrico, com cerca de 3 até 5 usinas, dependendo de estudos mais aprofundados, permitindo instalações de até 6000 MW em usinas reversíveis e até 500 MW em usinas convencionais. (Ver ILUSTRAÇÃO 3.2-1).

3.3 Região Nordeste

A região Nordeste apresenta também determinadas peculiaridades que podem favorecer a implantação de usinas reversíveis.

Os três principais centros de carga (Salvador, Recife e Fortaleza) são quase igualmente distanciados do único sistema hidrogerador disponível (CHESF - São Francisco); assim, os pontos de carga têm de ser atendidos através de despacho por longas linhas de transmissão com as inevitáveis perdas e/ou superdimensionamento das mesmas linhas.

A existência de condições fisiográficas favoráveis próximo a cada um destes centros, permite a consideração da economia redundante da instalação de usinas reversíveis próximas ao consumo.

Assim, os aproveitamentos de Pacatuba, CE (500 MW) em cujo estudo o autor participou, Pedra do Cavalo, BA (1000 MW), e Primavera, PE (1000 MW), apresentam condições favoráveis que merecem estudos mais aprofundados.

4. ASPECTOS ECONÔMICOS

4.1 Cotejo com Fontes Alternativas

As vantagens e competitividade das usinas de acumulação bombeada já têm sido aventadas no Brasil, principalmente, como uma alternativa mais econômica de fonte produtora de energia de ponta, quando comparadas com usinas hidrelétricas convencionais supermotorizadas. Esta situação enfatiza apenas os aspectos de geração hidrelétrica.

Os enfoques com relação aos aspectos de transmissão e distribuição dentro de uma ótica global do sistema elétrico, ainda são menos difundidos, razão porque as vantagens adicionais que as acumulações bombeadas propiciam neste caso, ainda não foram suficientemente esclarecidas e reconhecidas.

Na verdade, a competição acima referida pode existir em determinada faixa do diagrama da curva de carga, mas em outras faixas, pelo contrário, as usinas reversíveis e convencionais podem ser até complementares, principalmente no Brasil, onde a energia de suprimento necessária para o bombeamento das usinas reversíveis não tem necessariamente de ser 100% proveniente de usinas térmicas convencionais ou term nucleares, ao exemplo de outros países.

Além disso, no Brasil, a acumulação bombeada pode oferecer energia sazonal e reservas estratégicas de energia e/ou potência contra eventuais paradas bruscas de outras usinas, pelo fato de existir na região Sudeste, um grande número de locais propícios à acumulação bombeada, onde o porte do reservatório superior e também do inferior, podem ser economicamente justificados para volumes úteis de geração muito maiores do que os exigidos numa simples operação de ponta diária.

Os principais benefícios isolados ou em conjunto que são mais palpáveis nas acumulações bombeadas no Brasil, são os seguintes:

- Produção diária de energia firme de ponta e garantia de potência normalmente a um custo de instalação mais baixo do que qualquer alternativa na faixa de 600 a 1500 horas de operação anual. (Enquanto elas podem oferecer freqüentemente grandes potências entre US\$180 e US\$350/kw, as usinas convencionais supermotorizadas o fazem quase sempre acima de US\$350/kW para a motorização adicional.)

Normalmente, para utilizações de até 1500 h/ano (à potência plena), apresenta custos anuais de geração (9 a 13 mills/Kwh), inferior aos dos aproveitamentos hidrelétricos convencionais (quase sempre acima de 15 mills/Kwh), desde que a energia para bombeamento esteja disponível a custo marginal (até 3 ou 4 mills/Kwh).

- Produção de energia em caráter sazonal a um custo competitivo com usinas convencionais, especialmente térmicas, gerando poupança de combustíveis fósseis, permitindo que estas, devido ao alto custo operacional, sejam gradualmente desativadas ou colocadas na reserva do sistema.
- Aumento da segurança operacional global do sistema gerador de diversas maneiras (reserva girante, compensador síncrono e regulador de frequência).
- Constituição de reservas estratégicas de energia e potência contra paradas bruscas de outras usinas do sistema.
- Localização geográfica pode ser definida com certo grau de liberdade próximo aos grandes centros de carga, o que não ocorre com as hidrelétricas.

4.2 Complementação com Outras Fontes

Sob o ponto de vista de geração, o crescimento da potência instalada na forma de acumulação bombeada em um sistema, depende, principalmente, na parte de suprimento, da expansão da capacidade térmica nuclear e da expansão da capacidade hidrelétrica em bacias com grande quantidade de energia hidráulica excedente não aproveitável, e na parte de consumo, da evolução das curvas de carga característica do sistema (quanto mais baixo o fator de carga, mais facilmente pode acolher parcelas de acumulação bombeada).

Para fatores de capacidade inferiores a 0,20 e superiores a 0,05, dificilmente as acumulações bombeadas podem ser economicamente substituídas por outras formas de produção.

Torna-se muito mais racional então, que o planejamento energético aceite esta realidade e planeje o desenvolvimento do sistema gerador de maneira a poder fornecer sempre a energia necessária ao suprimento do ciclo de bombeamento da acumulação bombeada até os limites percentuais práticos de potência

instalada sob esta forma que hoje andam na casa dos 10 a 15% da potência total do sistema hidrotérmico.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Examinando-se o plano para o crescimento de potência instalada no Brasil, verifica-se que até o ano 1990, há previsão para instalação de cerca de 10.000 MW em usinas termonucleares e 65.000 MW em usinas hidrelétricas convencionais; sendo as pontas do diagrama da curva de carga previstas para serem completamente atendidas por usinas hidrelétricas eventualmente supermotorizadas, estratégia que normalmente não é a forma mais econômica, principalmente, levando-se em conta a capacidade ociosa nas usinas nucleares, a energia excedente no sistema hidráulico do Sudeste, e a defasagem hidrológica com o sistema da região Sul, já interligado.

Uma rápida agilização do planejamento hidroenergético seguindo as condições deste trabalho, traria à luz a importância e a atratividade destas usinas como complementação do sistema, inicialmente como fonte vantajosa de energia de ponta, e, posteriormente, com vantagens adicionais, pois, além do aumento de segurança e estabilidade do sistema elétrico, frequentemente, os reservatórios criados junto aos grandes centros, permitem o uso de reservas sazonais de energia firme adicional e/ou reservas estratégicas contra paradas bruscas de outras usinas do sistema.

Por isto, recomenda-se aos responsáveis pelo planejamento energético para geração elétrica que se sensibilizem para esta realidade, de maneira a incluir nas revisões dos programas e planos para os próximos quinquênios, o prosseguimento de estudos e a implantação dos primeiros Projetos de Usinas Reversíveis ao menos nas regiões Sudeste e Nordeste do país.

18 de abril de 1979

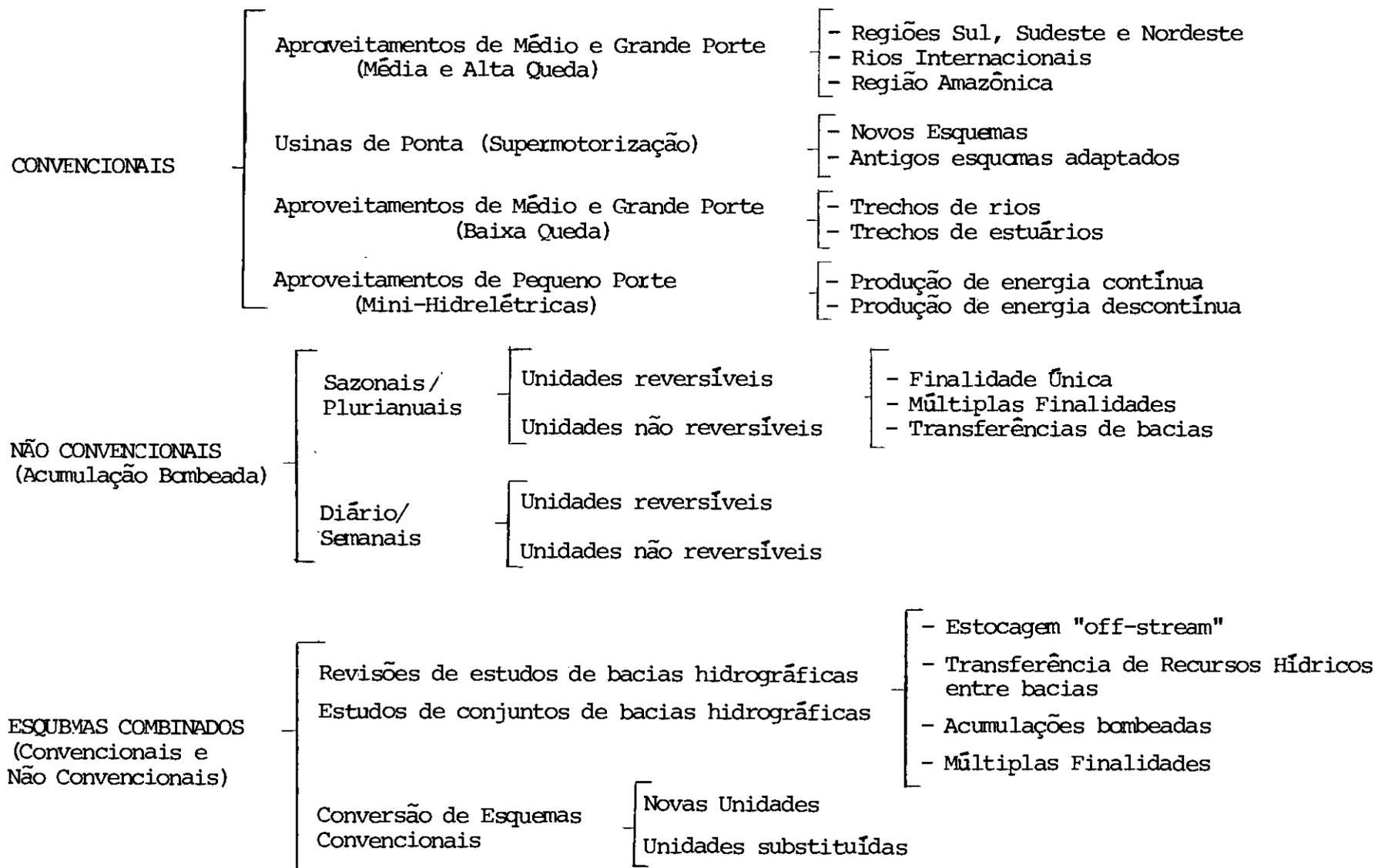
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

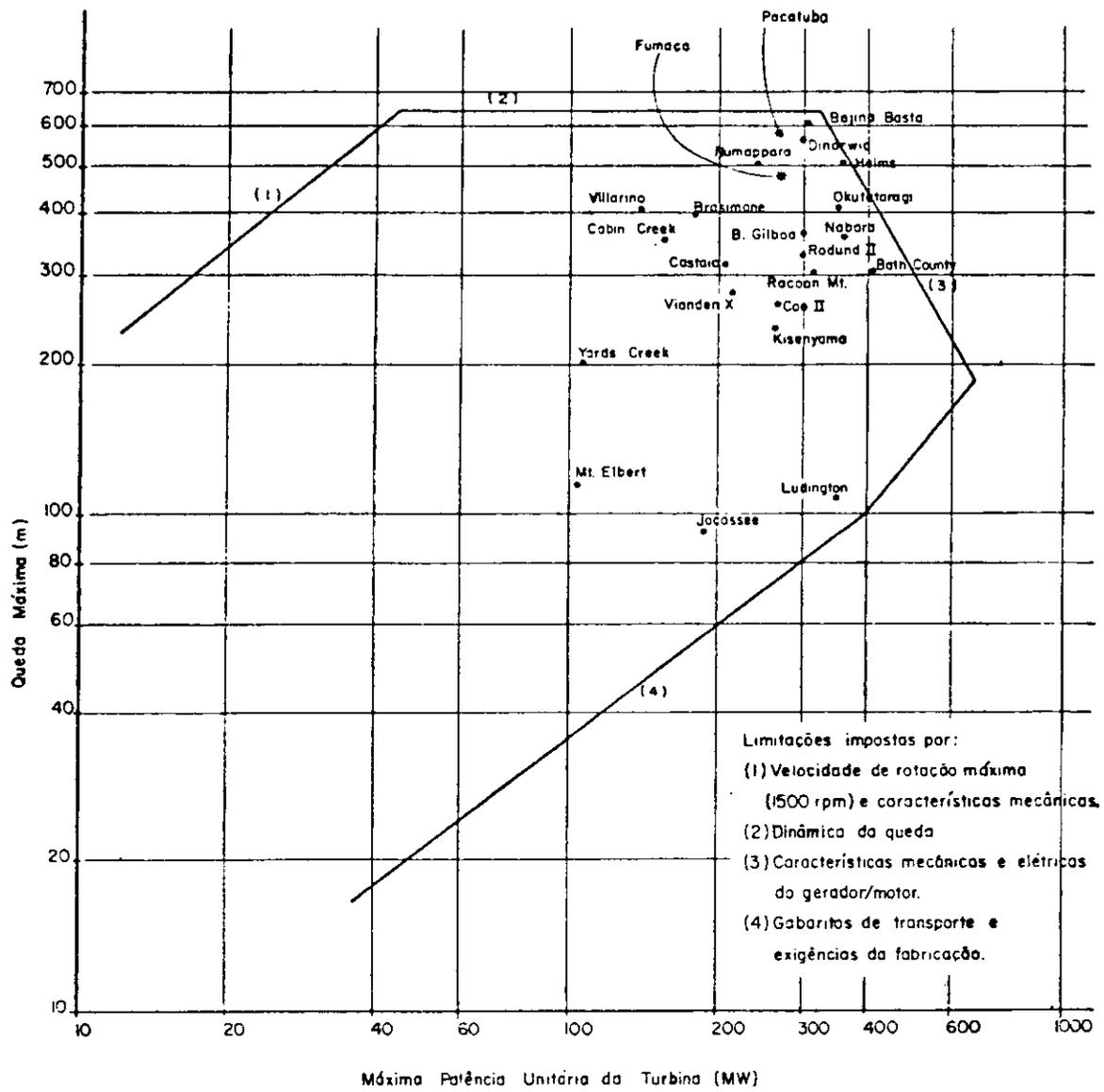
- CHANDRAKIS, M. S. Combined Pumped-Storage and Thermal Power. Water Power & Dam Construction, London, IPC Electronical-Electronic Press Ltd. 28(10):41-48, oct. 1976.
- COMPANHIA INTERNACIONAL DE ENGENHARIA. A Preliminary Market Study for the Possibility to Pumped-Storage Facilities. ASCE Engineering Foundation Conference, Rindge, N.H., USA, 1974.
- COMPANHIA INTERNACIONAL DE ENGENHARIA. Estudos Técnicos para Implantação de Usinas Reversíveis; aproveitamento de Fumaça. Rio de Janeiro, 1979.
- COMPANHIA INTERNACIONAL DE ENGENHARIA. Estudos Técnicos para implantação de Usinas Reversíveis; aproveitamento de Pacatuba. Rio de Janeiro, 1979.
- FURNAS, ELETROBRÁS, COMPANHIA INTERNACIONAL DE ENGENHARIA. Estudos Técnicos para Implantação de Usinas Reversíveis; aproveitamento de Guaripu. Rio de Janeiro, 1979.
- GARCIA, C. Rafael & Calvo, F. Previsión de Necesidades de Centrales Reversibles en Relación con el Programa de Centrales Nucleares.
- JORDÃO FILHO, Wilson. Acumulação Bombeada no Brasil - Perspectivas. Construção Pesada, São Paulo, 8(88):68-77, maio 1978.
- JORDÃO FILHO, Wilson & KERR, John Arthur. Transferência entre Bacias Hidrográficas. COMPANHIA INTERNACIONAL DE ENGENHARIA, Rio de Janeiro, 1976.
- JORDÃO FILHO, Wilson et alii. Usinas de Acumulação Bombeada - Aspectos Conceituais e Perspectivas de seu Desenvolvimento na Area de Influência de FURNAS. COMPANHIA INTERNACIONAL DE ENGENHARIA, Rio de Janeiro, 1977.
- KERR, John Arthur. Usinas Reversíveis e Outros Elementos Especiais de Sistemas de Reservatórios. COMPANHIA INTERNACIONAL DE ENGENHARIA, Rio de Janeiro, 1977.
- LOHMAN, C. A. J. Equipamentos para Usinas de Acumulação por Bombeamento de Alta Queda. III Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. ENEL. Curitiba, 1975.
- MARTIN-MENDILUCE, J. & R. HERAS. Importancia de los Esquemas Bombeo-Turbinación en los Estudios Integrales de Recursos Hidráulicos. IWRA, Madrid, 1974.
- MELENTIJEVIC, M. Development and Role of Hydropower Plants with Reversible Hydraulic Machines. IWRA, 2º Congresso Mundial, Índia, 1975.

- MITTELSTADT, R. L. & O. W. BRUTON. Potential for Pumped Storage in the Columbia River Hydro System. ASCE Engineering Foundation Conference, Rindge, N.H., USA, 1974.
- PARIS, Luigi. Análise das Funções das Usinas Hidrelétricas de Acumulação Bombeada no Sistema de Produção de Energia Elétrica.
- PENATTI, Savio. Introdução ao Sistema de Produção de Energia Elétrica com Acumulação Bombeada. Seminário de Usinas Reversíveis. Associação dos Engenheiros da CESP (AECESP). São Paulo, 1973.
- RACT-MADOUX, X. et alii. Usines d'Accumulation D'Énergie par Pompage Hydraulique ou Pneumatique. La Houille Blanche, Grenoble, Association pour la Diffusion de la Documentation Hydraulique, 6/7:483-619, 1972.
- RESH, R. H. & D. PREDPALL. Pumped Storage Site Selection: Engineering and Environmental Considerations. ASCE Engineering Foundation Conference, Rindge, N.H., USA, 1974.
- SUDENE - OVERSEAS TECHNICAL COOPERATION AGENCY OF JAPAN. Pumped Storage Projects in Nordeste. 1966.
- U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS - NORTH PACIFIC DIVISION. Pumped-Storage Inventory of the Pacific Northwest. Oregon, North Pacific Division, Corps of Engineers, 1976.

TABELA 2.2-1 - DESENVOLVIMENTO DOS APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS NO BRASIL
ESTRATÉGIA GLOBAL

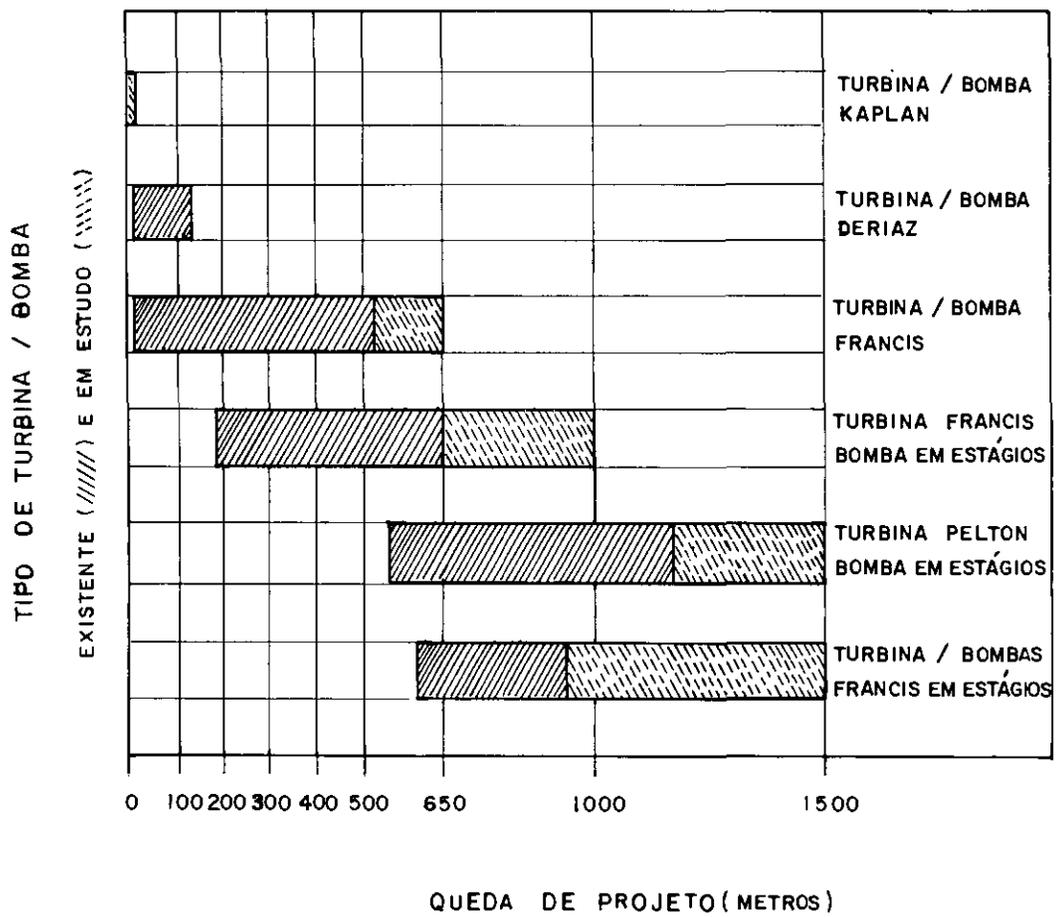
RE/GPH/32





LIMITAÇÕES NA FABRICAÇÃO DE TURBINA/BOMBA REVERSÍVEL TIPO FRANCIS

ILUSTRAÇÃO 2.2.1-1



LIMITES PRÁTICOS DE UTILIZAÇÃO DAS TURBINAS-BOMBA

1) ACUMULAÇÃO BOMBEADA SAZONAL - REGIÃO SUDESTE

Objetivos:

- A) Substituição de Térmicas Convencionais (transferindo-as para a reserva do sistema).
- B) Reserva estratégica contra paradas de usinas nucleares (longas).
- C) Retardamento da entrada em operação de novas usinas hidrelétricas convencionais.

ANOS NORMAIS (95% t)

Períodos Normais Chuvosos

- A-C) Bombeamento com energia proveniente da excedente no Sistema Hidráulico.
- B) Bombeamento com energia excedente e utilização da outra parcela desta energia do próprio Sudeste para suprir falhas de usinas do sistema.

Períodos Normais de Estiagem

- A-C) Turbinagem substituindo capacidade térmica a óleo, ou hidrelétrica convencional.
- B) Utilização da Acumulação Bombeada para suprir falhas de usinas do sistema.

ANOS CRÍTICOS (5% t)

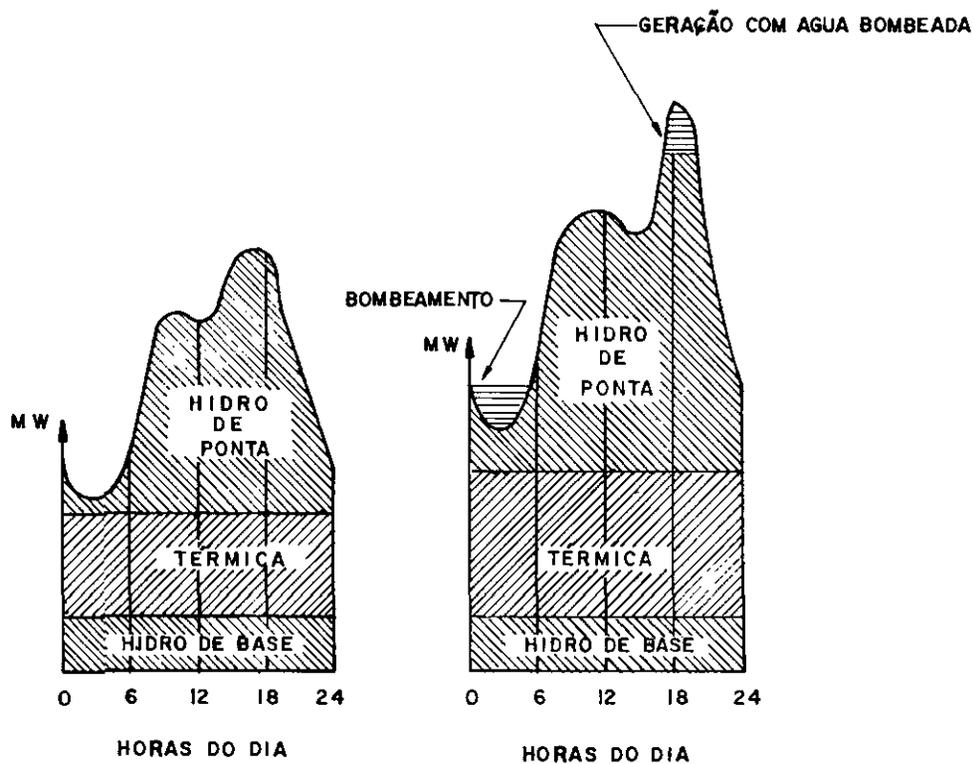
Períodos de Chuvas

- A-C) Bombeamento interrompido por falta de disponibilidades do sistema.
- B) Bombeamento interrompido, suprimento de falha por usinas preferencialmente térmicas.

Períodos de Estiagem

- A-C) Turbinagem interrompida e substituída por utilização das reservas nas usinas térmicas a óleo ou a carvão.
- B) Importação de energia excedente do sistema Sul para suprir falha no Sudeste.

USO DA ACUMULAÇÃO BOMBEADA (DIÁRIA)

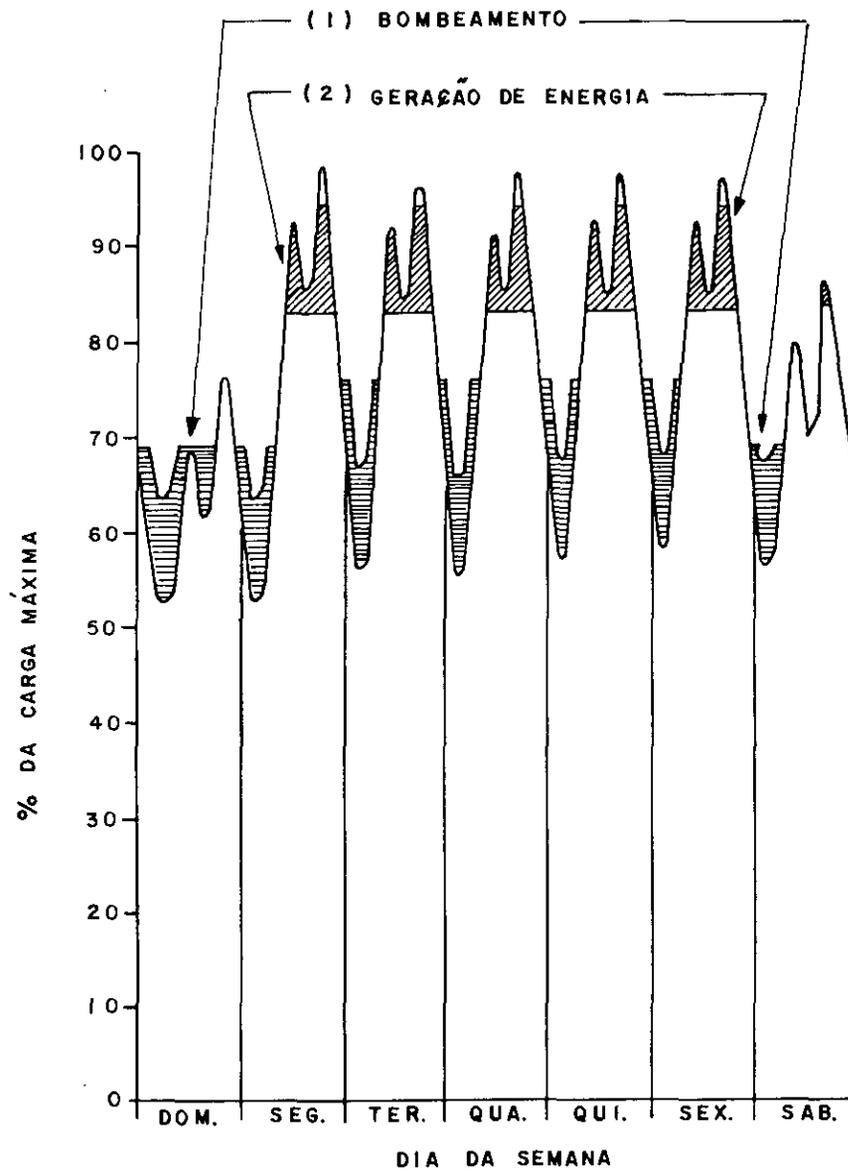


a-EXISTENTE SEM AC. BOMBEADA

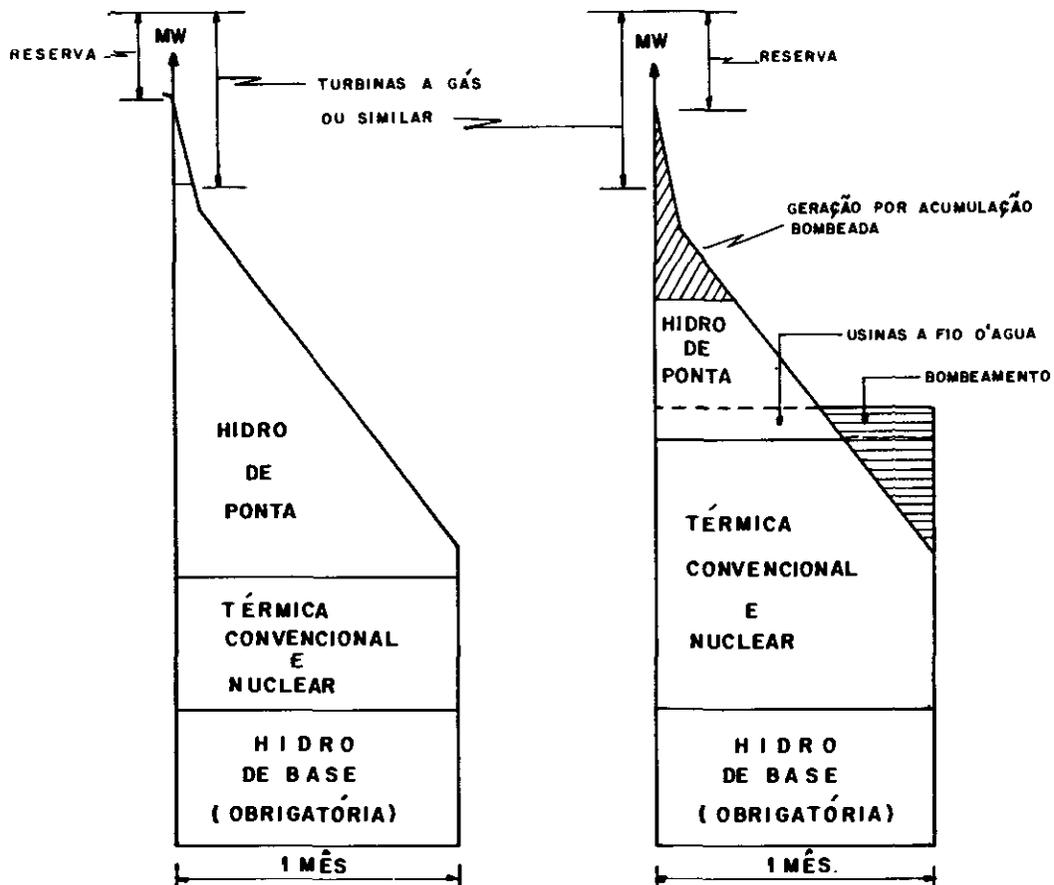
b-FUTURO COM AC. BOMBEADA

CURVAS DE CARGA DIÁRIAS INDICANDO O
PAPEL DE ACUMULAÇÃO BOMBEADA

USO DA ACUMULAÇÃO BOMBEADA (DIÁRIA/SEMANAL)



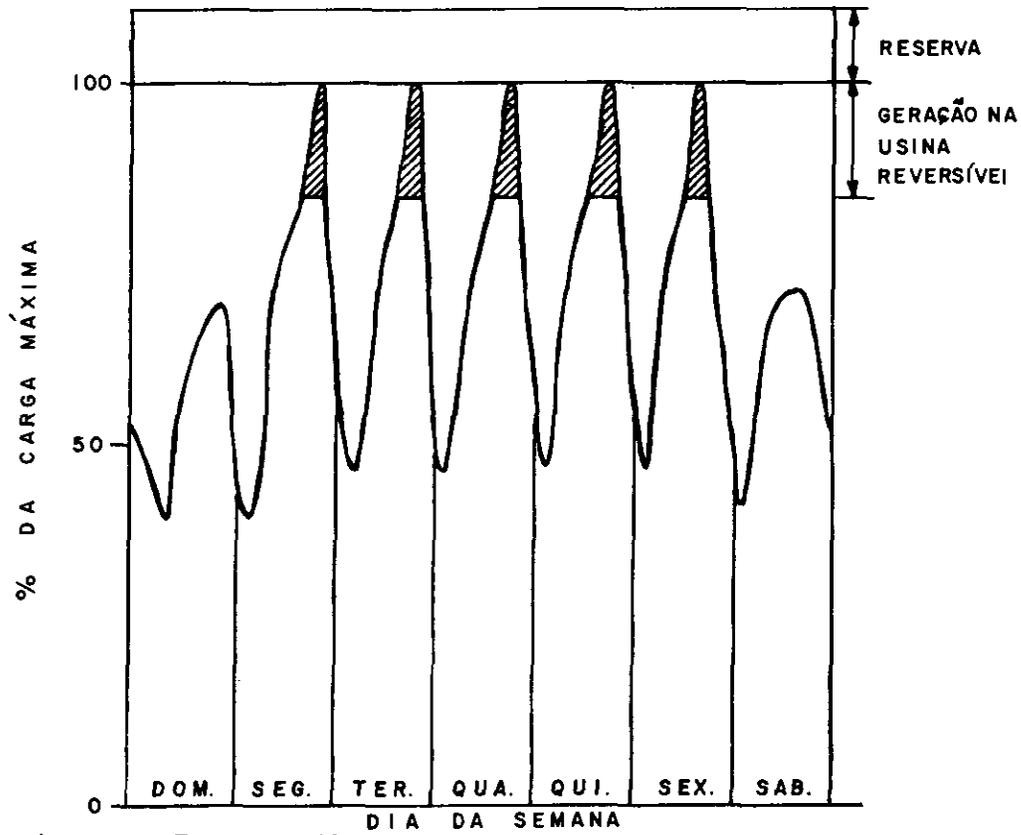
**CURVA DE CARGA SEMANAL INDICANDO
O PAPEL DE ACUMULAÇÃO BOMBEADA**



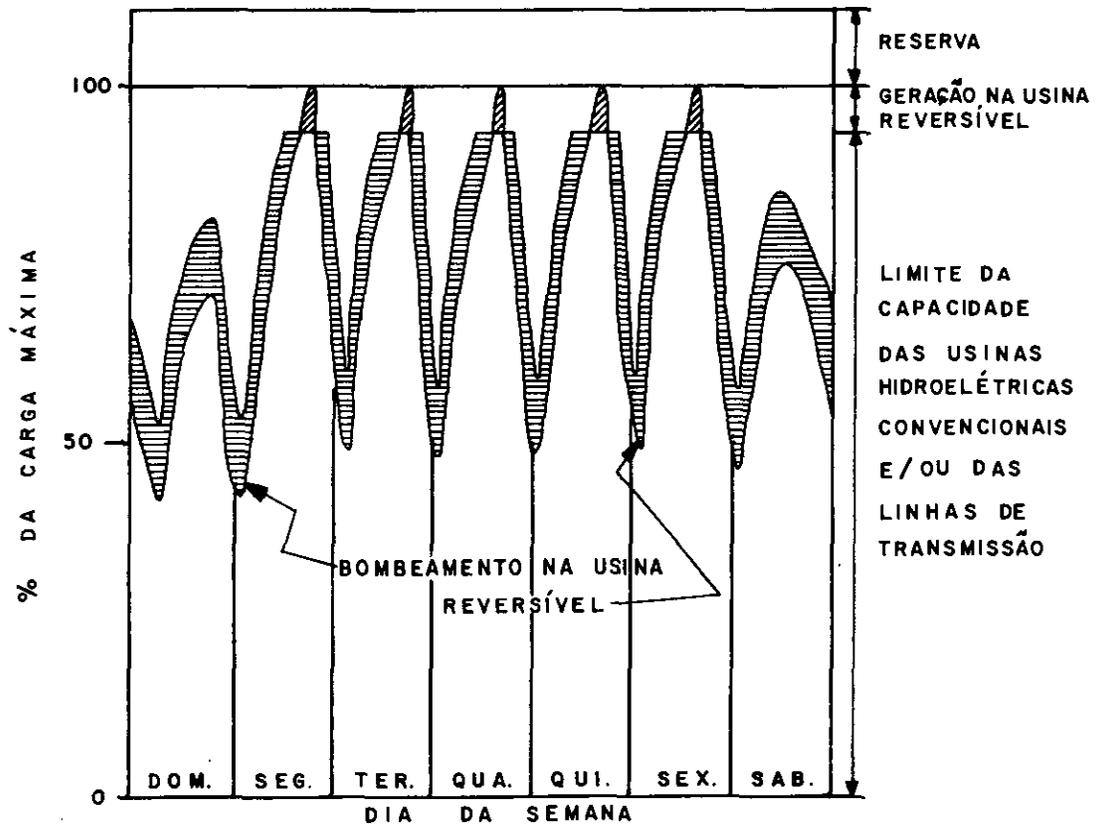
a-SISTEMA HIDRO-TÉRMICO
(SEM AC. BOMBEADA)

b-SISTEMA HIDRO-TÉRMICO
(COM AC. BOMBEADA)

**CURVAS DE DURAÇÃO DE CARGA E USO DE
ACUMULAÇÃO BOMBEADA DIARIA / SEMANAL**



a) DURANTE ESTIAGEM



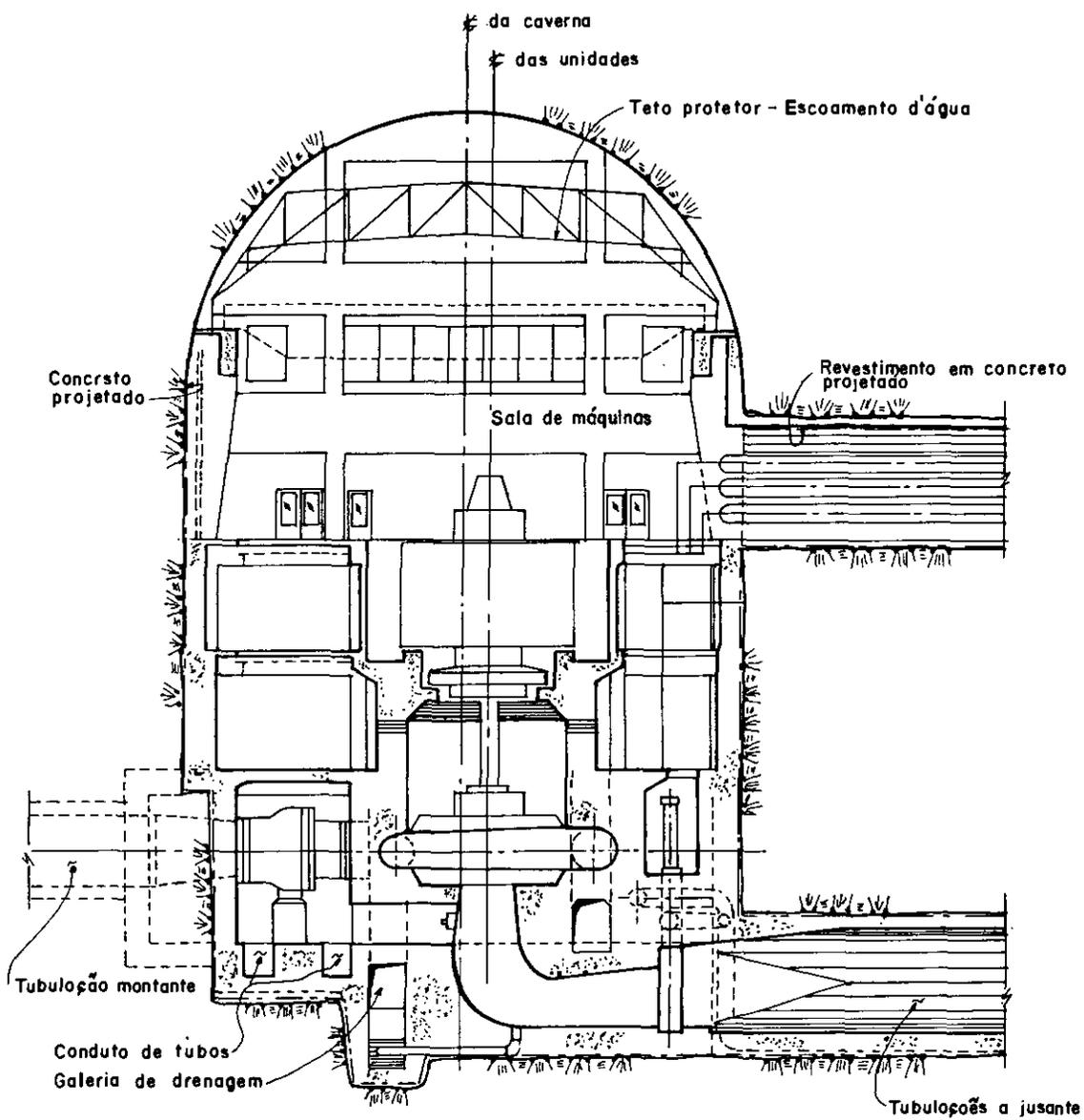
b) DURANTE PARTE DO PERÍODO ÚMIDO

CURVAS DE CARGA E PAPEL DE ACUMULAÇÃO BOMBEADA DO TIPO SAZONAL / DIÁRIO

TABELA 2.2.3-1 - USINAS COM TURBINA/BOMBA REVERSÍVEL DE MAIS DE 100 MW

APROVEITAMENTO	COMPRIMENTO DUTOS (m)			QUEDA LÍQUIDA (m)	DUTO QUEDA	VOL. UTIL. RES. SUP. (hm³)	ENERGIA ACUMULADA (GWh)	ENERGIA ESPEC. (Kwh/m³)	POTÊNCIAS UNITARIAS (MW)		Nº UNID. n	VELOC. ROTAÇÃO (RPM)	VELOCIDADES ESPECÍFICAS		VALORES K $K=N_{ST}\sqrt{H}$		SUBMR. (m)	CUSTO UNITÁRIO (US\$/KW) C	ANO INÍCIO OPERAÇÃO	
	L1	L2	L	H	L/H	Vu	Vu x H x B, 00272	e	Pt	Pb		N	(KW,m) KST	(ft,HP) N'ST	(KW,m) K	(ft,HP) K'				
	1	2	3=1+2	4	5=3/4	6	7	8=7/6	9	10		11	12	13	14	15				16
01. YARDS CREEK			1200	200	6.0	5,7	3,10	0,54	110	110	3	240	105	27,7	1485	710	7,5	84	1965	
02. CRUACHAN I			1500	343	4,37	11,1	10,3	0,93	100	112	2	500	106	28,1	1963	939	4,5	95	1965	
03. CRUACHAN II			1500	350	4,26	11,1	10,56	0,95	100	112	2	500	106	28,1	1963	939	4,5	95	1967	
04. CADIN CREEK				363					166	166	2	360	92	24,3	1753	839	11		1967	
05. MUDDY RUN			370	105	3,52	41,0	12,10	0,30	113	113	8	160	173	45,6	1773	848	10	30	1967	
06. VILLARINO				376					125		4	600	127	33,5	2463	1178	43		1959	
07. COO TROIS PONTS I	600	160	760	273	2,78	4	2,97	0,74	146	146	3	300	103	27,1	1702	814	18		1959	
08. KISENYAMA	900			220		5,28	3,159	0,59	240	240	1	225	129	34,1	1913	915	30		1970	
09. JOCASSEE				90					170	170	4	120	179	47,2	1698	812			1973	
10. NORTHFIELD				227					257	257	4	257	147	38,8	2215	1060	32		1973	
11. BRASIMONE			1120	378	2,96				170	150	2	375	92	24,2	1769	855	36		1973	
13. LUDINGTON				110					343	340	6	100	163	43,1	1710	818			1973	
14. GILEGA				348					250	300	4	257	85	22,4	1586	759			1973	
14. NUNABARA	2254	507	2761	500	5,52	4,1	5,576	1,01	230	250	3	375	75	19,9	1677	802	46		1973	
15. REVIN				234					200	200	4	300	145	38,4	2218	1061			1974	
16. FOYERS				163					160	150	2	273	179	47,3	2320	1110	39		1974	
17. VINDEN X				287					196	215	1	333	124	32,7	2100	1005			1975	
13. M. ELBERT				124					103	103	1	180	139	36,7	1548	741			1975	
19. RACON MT.	805	403	1208	317	3,8	44,424	38,3	0,86	384	384	4	300	138	36,4	2457	1176	39		1975	
20. NABARA	2414	446	2860	325	8,8	5,246	4,637	0,88	325	350	2	257	105	27,8	1893	906	46		1975	
21. CORNWALL				3048	320	9,52	30,8	27,7	0,90	257	257	8	257	95	25,2	1700	813	15		1977
22. CASTAIC	16500	0	16500	324	51	12,3	10,84	0,88	200	238	6	257	83	21,9	1494	715	15		1977	
23. ROUND II	715	75	790	357	2,21	2,3	2,23	0,97	253	245	1	375	128	33,7	2418	1157	36	134	1977	
24. COO TROIS PONTS II	800	200	1000	273	3,66	4	2,97	0,74	234	190	3	273	119	31,4	1966	941	16		1973	
25. BATH COUNTY	2500	0	2500	330	7,57	27,75	23,7	0,85	357	380	6	257	109	28,7	1980	947	25	373	1979	
26. CRUTATARAGI	645	2448	3093	406	7,62	21,36	23,588	1,10	310	314	1	300	91	24,0	1834	878	46		1979	
27. HELMS				498					358		3	360	91	24,1	2025	969			1950	
28. DINORNIC	3050	405	3455	514	6,72	6,5	9	1,38	300	300	6	500	111	29,3	2517	1204	60	100	1980	

RE/GPH/32



**CASA DE FÔRÇA SUBTERRÂNEA
SEÇÃO TRANSVERSAL TÍPICA - GRUPO DE MAQUINAS
USINA REVERSÍVEL DE FUMAÇA**

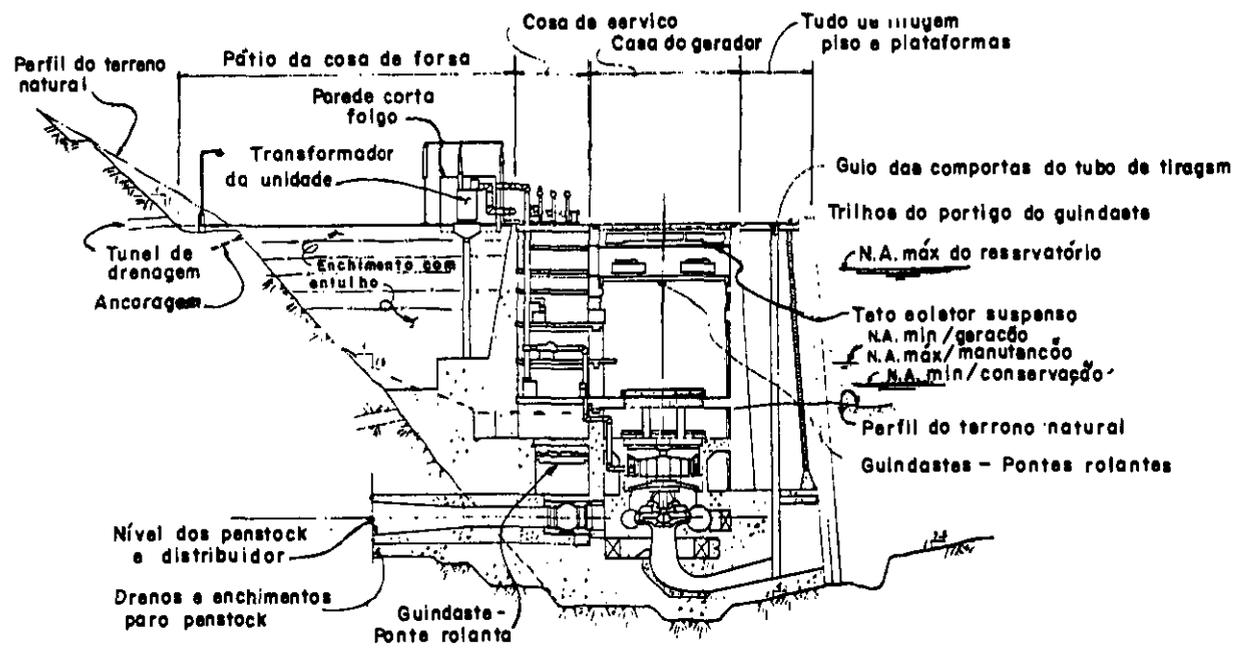
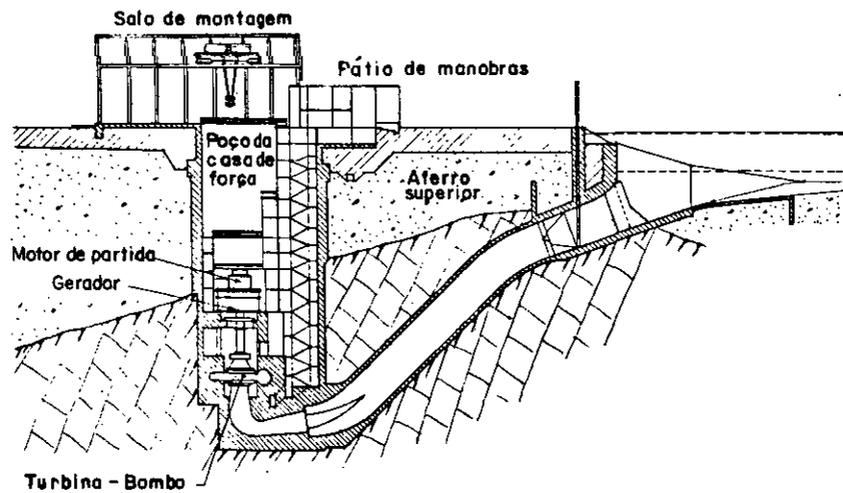


ILUSTRAÇÃO 2.2.3-2

CASA DE FÔRÇA A CÉU ABERTO
SEÇÃO TRANSVERSAL
USINA DE BATH COUNTY - E.U.A

ILUSTRAÇÃO 2.2.3-3



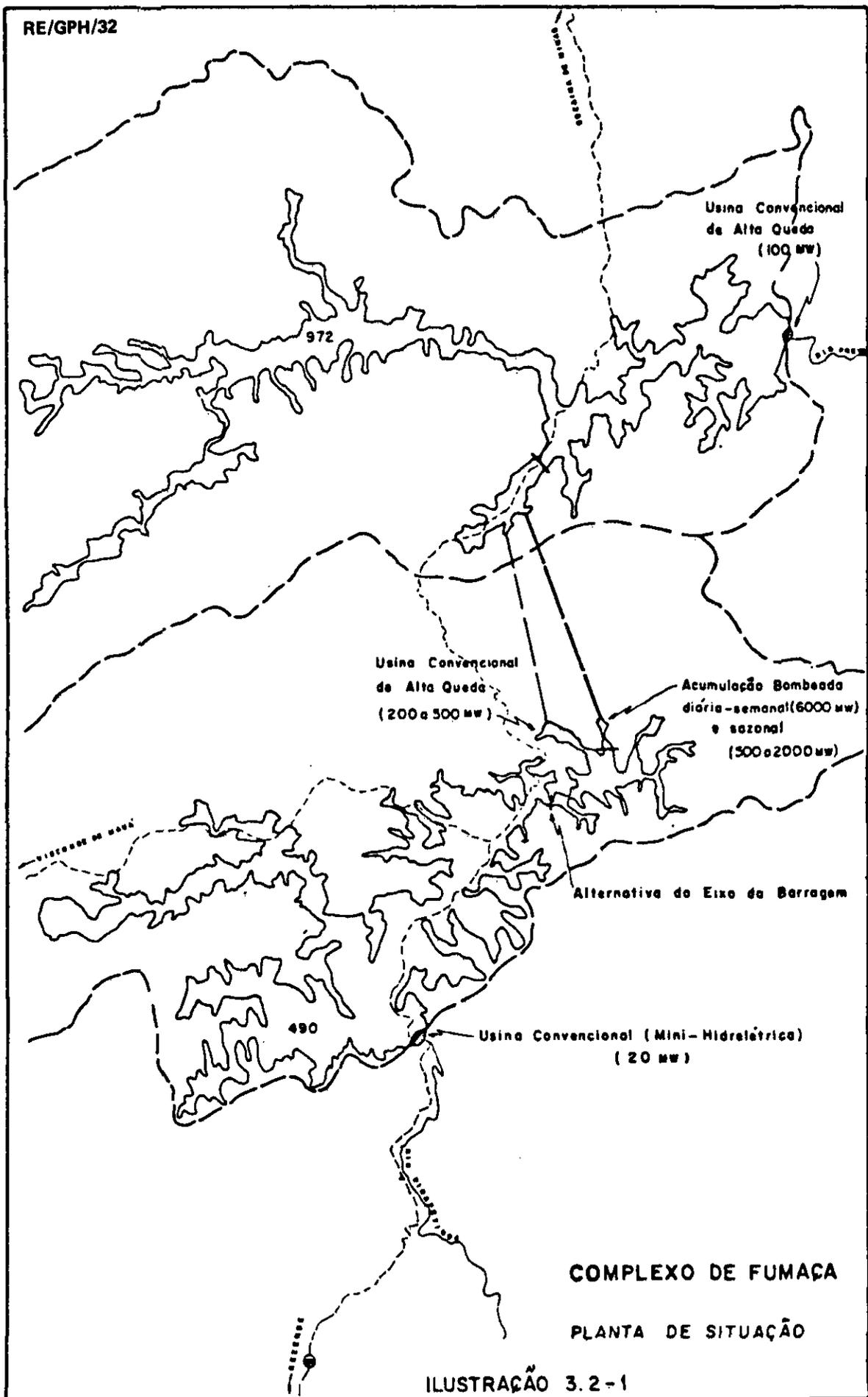
CASA DE FÔRÇA SEMI-ENTERRADA

SEÇÃO TRANSVERSAL

USINA DE RODUND II - AUSTRIA

RE/GPH/32

RE/GPH/32



COMPLEXO DE FUMAÇA

PLANTA DE SITUAÇÃO

ILUSTRAÇÃO 3.2-1