

12/79 16582

RE/GPH/25

V SEMINÁRIO NACIONAL DE
PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GRUPO I

PRODUÇÃO HIDRÁULICA
(G.P.H)

BOMDEAMENTOS DE GRANDE PORTE; UMA SOLUÇÃO ENERGÉTICA

Theophilo Benedicto Dttoni Netto
HIDROESB - Saturnino de Brito S.A.

Recife - PE - Brasil

1979

RESUMO:-

Torna-se cada vez mais frequente a implantação de Usinas Elevatórias de Grande Porte para atender a finalidades várias (polders, transposição de vazões entre bacias, etc.). Por outro lado, a moderna tecnologia hidro-energética vem dando ênfase crescente às Usinas Reversíveis (UR) — que funcionam bombeando e turbinando com o mesmo equipamento mecânico —, fato que abriu novo campo para bombeamentos de grandes vazões com a conjugação harmônica de dois aspectos operacionais de significativa relevância para a economia energética:— consumo de energia marginal (bombeamento) nas ocasiões de demanda reduzida do sistema, visando dispor desta energia para realizar posterior geração de energia valorizada de ponta (turbinamento) a ser fornecida a mercado ávido. Isso conduz a uma série de vantagens técnicas e econômicas para o sistema interligado (Usinas Convencionais mais Reversíveis) tais como:— maior segurança e flexibilidade operacional, melhoria do Fator de Carga, melhor utilização das instalações fixas, economia de combustível fóssil e de água, etc.

Ao par da inegável oportunidade na implantação das (UR) no atual sistema de geração brasileiro a base de Hidrelétricas Convencionais, há que se destacar sua importância na solução dos problemas de transposição de vazões entre bacias vizinhas ou próximas (superbombeamentos), com o que se poderá perenizar rios de regime "cortado" do nordeste (bacias carentes) através da importação de vazões dos volumosos cursos d'água perenes da região, tais como o São Francisco, Tocantins e Paraíba. A guisa de ilustração, apresentamos exemplos de alguns sistemas hidro-energéticos de superbombeamento, entre eles os das Usinas Reversíveis na Chapada do Araripe e na Serra Talhada que poderão viabilizar a perenização dos rios Jaguaribe, Piranhas e Paraíba do Norte, resolvendo definitivamente o problema das secas em extensa área do nordeste brasileiro. Tal solução energética, além disso, poderá trazer vantagens mercadológicas para a CHESF.

1 - A USINA DE BOMBEAMENTO DE GRANDE PORTE (UBGP)

1.1 - A Usina de Bombeamento de Grande Porte (UBGP) pode ser definida como sistema hidráulico destinado a promover a elevação

de grandes vazões líquidas com o objetivo de gerar benefícios diretos ou indiretos, para isso absorvendo grandes blocos de energia. Consiste fundamentalmente da composição dos seguintes órgãos hidráulicos (ILUSTRAÇÃO 1.1-1):- reservatório inferior, tomada d'água inferior; conduto adutor de alimentação das bombas funcionando de preferência com pressão positiva; grupo motor-bomba; conduto de recalque; difusor de jusante; reservatório superior. Em certas condições de projeto, para minimizar fenômenos transientes desfavoráveis, há conveniência na implantação de câmaras de equilíbrio de pressão, seja no final do conduto de alimentação seja no início do conduto de recalque e em pontos intermediários dos mesmos, caso sejam esses condutos extersos.

1.2 - Há que se considerar ainda os dispositivos mecânicos e elétricos que operam os diferentes órgãos hidráulicos que compõem o sistema de bombeamento (vários tipos de válvulas e adufas, pontes rolantes, stop-logs, pórticos de manobra, derivações, quadros de comando e de controle; circuitas auxiliares, medidores, estação transformadora, dispositivos de proteção e de segurança, etc.) e mais as indispensáveis obras civis que podem representar parte ponderável dos custos (barragens com seus órgãos auxiliares, casa de máquinas, pátios de serviço, estradas, acessos, etc.).

1.3 - A composição dos órgãos hidráulicos, obras civis e dispositivos eletro-mecânicos visando o planejamento e implantação da UBG, depende da análise de uma série de fatores, dentre os quais destacamos como os mais importantes:- objetivo a ser atendido pelo projeto; aspectos topo-geológicos da região; aspectos hidro-sedimentológicos dos recursos hídricos a serem aproveitados ou controlados; aspectos ecológicos; aspectos relacionados ao fornecimento de energia e as facilidades de acesso.

1.4 - A tomada de decisão visando implantar uma UBG dependerá, além dos indispensáveis estudos de viabilidade técnica, da realização de cuidadosos estudos de viabilidade econômica onde deverão ser determinados os seguintes valores principais:-

1.4.1 - quanta a previsão dos custos:- parcela correspondente a amortização do capital destinado a construção (custo do capital); parcela para atender as despesas de operação, manutenção e conservação (custo OMC); parcela destinada a atender a despesa com

a energia consumida (custo de energia).

1.4.2 - quanto a previsão dos benefícios:- deverão ser calculadas as parcelas referentes ao uso das águas bombeadas (benefícios tangíveis) que deverão propiciar bens, serviços ou utilidades (abastecimento d'água de cidades e indústrias, irrigação de glebas, drenagem de solos, defesa contra inundação de áreas valorizadas, valorização hidrológica de bacias hidrográficas, controle de poluição hídrica, etc.) além de benefícios intangíveis que poderão ter caráter decisório em certas situações.

1.5 - Nestas instalações o custo da energia destaca-se como uma das parcelas de grande significação. Isto porque de acordo com o planejamento operacional das unidades de bombeamento (tempo de funcionamento dos grupos motor-bomba) o consumo de kwh poderá representar despesa da ordem de grandeza muito superior ao custo do capital.

1.6 - Por outro lado, dependendo dos esquemas de trabalho dos grupos motor-bomba, o mercado consumidor de energia passará a ser reforçado por blocos de consumo capazes de modificarem a curva de demanda. Duas situações limites poderão se dar:-

a) - o tempo de operação das bombas (TB) será de 24 horas / dia (ILUSTRAÇÃO 1.6-1B). Nesse caso haverá acréscimo do patamar básico da curva de consumo o que obrigará as pontas de consumo a se tornarem mais elevadas (aumento de P_{max}). Isso conduzirá a necessidade de aumentar a potência instalada (se não existirem reservas) através de novas implantações geradoras (supermotorização de Usinas Geradoras Convencionais e/ou novas Usinas Geradoras). Como consequência ter-se-ão novas despesas de capital e maiores consumos de água e/ou combustível; o custo de energia consumida no bombeamento será maior, face a tarifa ser mais cara.

b) - o tempo de operação das bombas (TB) coincidirá com as épocas de folgas de consumo, seja $(TB) < 24$ horas/dia (ILUSTRAÇÃO 1.6-2). Com a utilização da capacidade atual de geração nessas horas de folga, melhorar-se-á o fator de carga do sistema a evitar-se-ão gastos de capital para reforçar a potência instalada de geração. Em contrapartida aumentar-se-ão os gastos operacionais do sistema gerador (água e/ou combustível), além de ser

acrescido o custo de implantação e de operação da UBG (maiores vazões de projeto; operação mais complexa); o custo de energia para atender ao bombeamento resultará mais baixo do que na situação anterior, por ser a tarifa mais econômica (tarifa noturna).

1.7 - A solução mais econômica para o empreendimento (UBG) dependerá, assim, de cuidadosos estudos, que envolvem considerações relacionadas às características do mercado de energia — tanto no consumo quanto na geração —, além dos aspectos eminentemente técnicos de natureza hidráulica, mecânica e elétrica. O bombeamento contínuo só se justifica economicamente em casos especiais, pouco frequentes, quando houver sobras substanciais de energia hídrica, por exemplo, fato que poderá justificar a supermotorização de Usinas Hidrelétricas convencionais capaz de gerar energia de base destinada exclusivamente a atender ao grande bombeamento; outra solução seria a geração de energia para atender a UBG realizar-se através de Usinas Termelétricas ou Termonucleares, solução essa muito onerosa face aos custos atuais dos combustíveis.

1.8 - A solução possivelmente mais adequada consiste em utilizar as folgas da capacidade instalada do sistema gerador, promovendo nas horas de consumo mínimo (normalmente a noite), situação em que (TB) será menor que 24 horas, seja a UBG funcionando intermitentemente. Mesmo nessa situação é indispensável dispor-se de energia sobrando — de origem hídrica e/ou de combustível — para ser aproveitada nos geradores que compõem a capacidade instalada atual do sistema de geração, a fim de ser possível produzir-se a energia elétrica indispensável ao bombeamento noturno.

2 - A ACUMULAÇÃO BOMBEADA (AB)

2.1 - Há cerca de meio século a tecnologia na área energética vem se preocupando com o significado mercadológico relacionado à geração e consumo de energia nas condições especiais que caracterizam a operação econômica das UBG.

2.2 - O atendimento da demanda energética é realizado através da correspondente geração de energia praticamente instantânea. Esse fato representa a característica fundamental dos sistemas

eletro-energéticos convencionais. Como o consumo de energia é variável com o tempo, em maior ou menor grau de acordo com o tipo de consumidor, constata-se na prática que o mercado energético sofisticado deve considerar, de um lado as variações de demanda, e do outro a necessária produção de energia elétrica capaz de satisfazer a demanda. Os anéis e circuitos distribuídos nos sistemas interligados atendem ao objetivo de regularizar permanentemente dois fatores fundamentais:- consumo e geração de energia. Normalmente a geração elétrica destinada a atender ao mercado consumidor de energia (usinas térmicas, nucleares e hidráulicas) obriga implantações (capacidade instalada) bem maiores do que a potência média (daí o conceito de fator de carga). Conclui-se assim que durante grande parte do tempo haverá folga operacional (F) no sistema gerador graças ao não uso da capacidade instalada em sua plenitude (ILUSTRAÇÃO 2.2-1A). Como consequência, é óbvio que o custo do capital (relacionado a capacidade instalada do sistema) não é economicamente aproveitado.

Teoricamente, para fins de raciocínio (perdas nulas), as necessidades de demanda poderiam ser atendidas de acordo com o seguinte esquema operacional (ILUSTRAÇÃO 2.2-1B):- a capacidade instalada seria correspondente a potência média (P_{med}) (usinas geradoras térmicas, nucleares e hidráulicas); as folgas (F) durante os períodos (TB) de não utilização da totalidade desta capacidade instalada, seriam aproveitadas para gerar energia (áreas 123; 567) independente das necessidades da demanda normal; essa energia sobrando gerada com o aproveitamento da capacidade instalada, seria acumulada (reservada) para utilização nas ocasiões de maior demanda (área 345); a geração complementar para atender às maiores demandas durante o período (TG) deveria resultar somente do uso desta energia reservada durante os períodos (TB), sendo operada durante o tempo (TG).

Esse esquema de geração se fundamenta na utilização de reservas de energia disponíveis, aproveitando para tal, folgas da capacidade instalada do sistema de geração convencional.

2.3 - O esquema energético teórico acima referido, exige menor custo do capital para atender ao mercado consumidor (ILUSTRAÇÃO 2.2-1B) e se justifica como economicamente mais adequado so:-

for compensador o acréscimo do custo do capital necessário à construção das novas gerações complementares (novas Usinas Geradoras para atender ao mercado $\overline{345}$), realizando-se assim o aproveitamento das folgas (F) com a utilização da reserva energética equilibradora; existirem condições práticas de operação do sistema de geração (aspecto técnico) que permitam utilizar as reservas de energia (áreas $\overline{123}$; $\overline{567}$) com custos mais vantajosos (aspecto econômico).

2.4 - Os aproveitamentos energéticos costumam, de início, atender ao conceito da ILUSTRAÇÃO 2.2-1A. Há, no entanto, que se admitir que o crescimento progressivo da demanda com o tempo, tenderá à implantação do esquema energético teórico representado na ILUSTRAÇÃO 2.2-1B, isto é:- o sistema de geração constituído por Usinas Geradoras Convencionais, ao invés de ser reforçado com outras gerações convencionais para satisfazer aos aumentos da demanda com o tempo, poderão ser considerados, paulatinamente, como atendendo a sistemas que disponham de reserva de energia, desde que sejam atendidas as considerações referidas no item 2.3.

2.5 - As reservas de energia a serem aproveitadas (folga da capacidade instalada do sistema) para realizar esquemas de geração de ponta mais adaptáveis a demanda, poderão ser de origem térmica, nuclear ou hidráulica, desde que existam combustíveis ou energia hidráulica disponível (sobra d'água para ser turbinada nas usinas hidrelétricas existentes) capaz de gerar a energia representada pelas $\overline{123}$; $\overline{567}$. A maneira de realizar o aproveitamento dessas folgas (F) da capacidade instalada deverá ser aquela que se mostrar mais vantajosa técnica e economicamente, resultando assim em energia elétrica disponível não consumida pela demanda normal.

2.6 - Essa energia elétrica sobrate produzida nas épocas (TB) poderá ser transformada em energia potencial (acumulação de energia) para ser utilizada nas ocasiões (TG) onde seria produzida a geração complementar destinada a reforçar o sistema gerador visando atender as demandas de ponta. Para realizar tal esquema energético é necessário decidir qual a melhor forma de realizar a acumulação energética citada.

2.7 - Note-se o aspecto de alta significação desse esquema complementar gerador de energia:- a reserva de energia é caracterizada pelo aproveitamento das folgas (F) da capacidade instalada do sistema de geração convencional; tal energia gerada deverá ser acumulada de alguma forma; a utilização desta energia potencial para reforçar o atendimento da demanda, dar-se-á em ocasião posterior (horas, dias, meses ou anos) à época em que as reservas foram aproveitadas.

2.8 - Com base nos conceitos expostos conclui-se que:- as reservas energéticas derivadas das folgas (F) poderão ser aproveitadas sob forma de combustíveis (fóssil ou nuclear) de custo elevado nos dias atuais, ou das águas sobrantes (escoadas pelos sangradouros por exemplo) nos sistemas hidrelétricos convencionais; tais reservas são transformadas em energia elétrica no próprio sistema de geração convencional utilizando as folgas (F) da capacidade instalada (horas noturnas); essa energia elétrica é transformada em energia potencial como por exemplo, recarregando baterias (energia eletroquímica), produzindo ar comprimido (energia pneumática) ou elevando massas d'água a alturas e localizações convenientes (energia hidráulica); a energia potencial assim reservada seria utilizada nas épocas de maior demanda impulsionando geradores que reforçarão o sistema energético nessas ocasiões de consumo de ponta.

2.9 - Das várias modalidades acima citadas, aquela que vem se mostrando mais vantajosa - técnica e economicamente - é a que utiliza a Acumulação Bombeada (AB), seja:- as reservas energéticas (folga F) são representadas por combustíveis ou água, disponíveis nos sistemas geradores convencionais implantados; a energia elétrica assim produzida (pelas Usinas Geradoras existentes) transformar-se-á em acumulações hidráulicas em cotas superiores através de bombeamentos hidráulicos que utilizam a energia elétrica resultante de tais reservas (bombeamentos noturnos; períodos TB); essa energia hidráulica potencial será utilizada nas épocas de maior demanda através da operação de turbinas hidráulicas convencionais que complementarão a geração para atender ao mercado de ponta (períodos TG).

2.10 - Possivelmente uma das primeiras Acumulações Bombeadas do

mundo realizada de acordo com o esquema referido, foi a de Rocky River, nos EUA, em 1927, com potência de bombeamento de 16.300 HP e de turbinamento de 24 Mw. A energia sobrando absorvida pelo bombeamento é de origem hidráulica; a casa de máquinas abriga uma turbina (24 Mw) e duas bombas (2 x 8.150 HP) independentes.

2.11 - Construído em 1933, o aproveitamento de Lake Lamoka Plant, EUA, compõe-se de 6.600 HP de geração térmica (gás combustível) mais 2.500 HP de geração hidráulica, ambas as gerações funcionando em paralelo nas horas de "peak". À noite a geração térmica fornece energia para uma bomba que recalca pouco mais de 500 l/s para o reservatório de carga da turbina.

2.12 - Ainda com referência aos aspectos históricos cabe citar que em 1934 existiam 64 aproveitamentos com (AB) em todo o mundo, sendo 24 na Alemanha, 16 na Itália e 8 na Suíça. Em todos eles as bombas e as turbinas funcionavam independentemente.

2.13 - Com o desenvolvimento tecnológico dos últimos decênios, as máquinas hidráulicas e elétricas foram se aperfeiçoando e se tornando cada vez mais eficientes e econômicas. Por outro lado as exigências de energia cresceram e vêm crescendo aceleradamente, obrigando a novas soluções e a implantações energéticas cada vez de maior porte. As ILUSTRAÇÕES 2.13-1 e 2.13-2 mostram o crescimento sugestivo das Usinas Geradoras com Acumulação Bombeada, nos EUA, Europa, América do Sul e Japão até 1974. Note-se que a partir de 1960 observam-se os maiores crescimentos na capacidade instalada dessa nova forma de geração de energia que vêm assumindo importância cada vez maior.

2.14 - A potência instalada nos EUA, em 1974, com Usinas Geradoras convencionais era de cerca de 62.000 Mw com aproximadamente 1.500 Usinas Hidrelétricas em operação. Até junho de 1974, operavam nesse país, Usinas de Acumulação Bombeada com capacidade instalada perfazendo total de 8.200 Mw sendo que se acham em fase de implantação mais 29.000 Mw.

2.15 - Em 1974, na Alemanha, cerca de 10% de sua capacidade energética instalada global correspondia a Acumulação Bombeada; na Bélgica esse índice era de 6% e deverá passar a 12% em breve.

Na Suíça vai a 5%. Nos EUA essa proporção vem crescendo e poderá chegar a 25% dentro de alguns anos.

2.16 - No Brasil existem algumas pequenas Usinas de Acumulação Bombeada como Pedreira (1939), Traição (1940), Vigário e Santa Cecília (1952), Edgar de Souza (1955) no rio Tietê. Em nosso país instalou-se na Usina de Traição, SP, em 1939, a primeira máquina reversível do mundo do tipo Francis, de fluxo axial com hélice regulável, vazão de $51 \text{ m}^3/\text{s}$, altura de elevação de 9m, 7.000 HP de potência consumida. Na década de 30, graças ao des-cortínio do engenheiro Billings foram realizados audaciosos projetos para a época, que se concretizaram no sistema energético da então Light and Power que abastecia o maior parque energético do país (eixo Rio-São Paulo). Desde então o Brasil vem desenvolvendo programa energético amplo e ambicioso com ampliações na geração e na distribuição de energia, realizando novas implantações no campo hidro-energético convencional, área onde nosso país dispõe de condições favoráveis quanto às disponibilidades hídricas e aos aspectos topo-grafológicos pertinentes.

2.17 - Quanto às Acumulações Bombeadas, além das implantações já referidas e que vêm sendo operadas há dezenas de anos de forma normal, nada mais se fez de concreto até hoje em nosso país. O que nos coloca desfavoravelmente em relação a outros países (EUA, Japão, países europeus) que vêm tratando o assunto com grande interesse e determinação. A ELETROBRÁS e algumas de suas subsidiárias e associadas vêm nesses últimos anos estudando seriamente a implantação de Usinas de Acumulação Bombeada visando reforçar o sistema Energético do País. Tudo faz crer que essa seja a solução mais prática e econômica para melhorar a eficiência do aproveitamento do nosso atual sistema de geração baseado nas Usinas Hidrelétricas Convencionais, as quais, deixam de utilizar boa parte das reservas hidro-energéticas disponíveis. Além disso há que se levar em conta o elevado custo dos combustíveis, fato que vem restringindo (razões econômicas) o emprego de Usinas Termelétricas. Por outro lado as Usinas Termonucleares - grande esperança para a produção energética mundial - estão sendo implantadas em regime de expectativa vigiada e, no momento tal solução vem sendo objeto de debates e controvérsias de resultados imprevisíveis.

2.18 - Sabendo-se que:-

- a) o mercado energético brasileiro (geração e consumo) já se encontra em grau de maturidade suficiente para ser enriquecido com novas fontes de geração que atendam as demandas de ponta;
- b) o custo do quilowatt instalado das Usinas de Acumulação Bombeada costuma ser bem menor do que o custo de instalação das Usinas Hidrelétricas Convencionais;
- c) o custo de operação das Usinas Termelétricas vem se tornando cada vez maior devido ao elevado custo dos combustíveis;
- d) a diversificação operacional utilizando outras modalidades de geração aumenta a segurança do sistema energético e lhes confere maior grau de confiabilidade;
- e) o aumento da capacidade instalada de geração pode resultar em melhores índices de produtividade econômica para o sistema energético, fato que poderá resultar em tarifas mais econômicas;
- f) é de extrema importância que os sistemas hidro-energéticos permitam outros usos para as disponibilidades hídricas tais como:- abastecimento d'água de cidades e indústrias, irrigação, recreação e lazer, valorização de bacias hidrográficas carentes, navegação interior, etc.;

conclui-se ser de alto interesse para o Brasil a implantação de Acumulações Bombeadas, com a urgência que a atual situação energética do País impõe.

3 - A USINA REVERSÍVEL (UR)

3.1 - Por definição, a Usina Reversível (UR) constitui sistema hidráulico capaz de realizar com a mesma implantação as duas atuações hidro-energéticas seguintes:- a Acumulação Bombeada (pumped-storage) por meio de bombeamento convencional e a Geração consequente (nas ocasiões de ponta) através de turbinamento convencional, ambas as atuações promovidas pelo mesmo equipamento hidráulico e elétrico. As vazões aproveitadas vão e voltam na mesma canalização, obrigando a rotações contrárias (num e noutro sentido) do eixo de giração do grupo turbina/gerador e motor/bomba. A mesma máquina, portanto, ora trabalha absorvendo energia (motor/bomba) com rotação em um sentido, ora funciona fornecendo energia elétrica (turbina/gerador) com rotação em sentido contrário. Daí a denominação "Usina Reversível".

Na ILUSTRAÇÃO 3.1-1 mostra-se como esses bombeamentos e turbinamentos se processam em ciclos diários de operação.

3.2 - Considerando o esquema operacional, as (UR) poderão ser classificadas em:- de regularização horária, quando houver bombeamento nas horas de demanda mínima do sistema, realizando turbinamento nas horas de ponta; de regularização diária/semanal, quando a regularização energética se processar com o aproveitamento da energia sobrando, nos dias de menor consumo (fins de semana, domingos) (em geral é também de regularização horária); de regularização mensal/sazonal, quando operam de acordo com o mesmo conceito de regularização energética, porém com o bombeamento se realizando nos meses de chuvas (sobras d'água com maior permanência) e o turbinamento se dando nos meses de estiagem. Nesse caso, as duas operações de regularização (bombeamento e turbinamento) podem se processar durante dias, semanas ou mesmo meses.

3.3 - Modernamente as (UR) constituem instalações típicas em que se observam os seguintes aspectos característicos (ILUSTRAÇÃO 3.3-1):-

- a) um reservatório inferior que fornece água para os bombeamentos e recebe água dos turbinamentos; deve ser estudado e projetado levando em consideração esse duplo aspecto;
- b) tomada d'água (para os bombeamentos), ao mesmo tempo obra de reposição de vazões (dos turbinamentos), implantada no reservatório inferior. Essa obra hidráulica deverá ser projetada levando em conta essa duplicidade operacional, fato que obriga a certas considerações especiais que a diferenciam de uma obra de tomada d'água comum;
- c) conduto inferior de adução (conduz as vazões a serem bombeadas do reservatório inferior para a bomba) e de descarga (repõe as vazões turbinadas ao reservatório inferior). Nos condutos extensos é necessário prever câmara de equilíbrio próximo a casa de força para minimizar fenômenos transientes desfavoráveis (sobrepressões devido a golpes de ariete);
- d) casa de força contendo as máquinas hidráulicas (bombas e turbinas, independentes ou não), os grupos motor/gerador respectivos, quadros de comando e de controle, dispositivos de seguran-

ça e de partida, ponte-rolante, fiação, instalações auxiliares, etc.;

e) conduto superior de recalque (bombeamento) e de carga (turbinamento) que comunica as máquinas hidráulicas com o reservatório superior. Quando esse conduto for extenso pode-se prever câmara de pressão junto a casa de força para minimizar fenômenos transientes;

f) reservatório superior que recebe as vazões bombeadas e fornece as vazões a serem turbinadas; deverá ser projetado levando em conta esse duplo aspecto operacional;

g) tomada d'água (turbinamentos) e estrutura de reposição de vazões (bombeamentos), obra hidráulica com dupla finalidade operacional, a qual deverá ser implantada no reservatório superior.

3.4 - O arranjo das obras hidráulicas acima referidas vai depender fundamentalmente das condições topo-geológicas, daí a grande variedade de aspectos apresentados pelos sistemas hidráulicos que constituem (UR). Vejamos alguns dos mais comuns:- os reservatórios (inferior e/ou superior) podem ser utilizados de aproveitamentos existentes. Isso costuma trazer grande economia ao empreendimento; a Casa de Força poderá ser a céu aberto ou subterrânea; o conduto destinado aos escoamentos T e B (inferior e/ou superior) deverá ser o mais curto possível para minimizar as perdas de carga nos escoamentos de bombeamento (consumo de energia) e de turbinamento (geração de energia). Desta forma melhora-se o rendimento operacional da UR. A relação L/H não deve ultrapassar 10, sendo que os valores compreendidos entre 2 e 4 são os mais verificados nos projetos modernos; para quedas de até 500 a 750 metros, pode-se utilizar máquina única de simples estágio com rotação reversível, isto é, bomba/turbina acoplada diretamente a motor/gerador (ILUSTRAÇÃO 3.4-1). No QUADRO 3.4-1, mostra-se as características principais das máquinas empregadas em Usinas de Acumulação Bombeada em função da queda limite; para quedas elevadas (1.200m) as máquinas poderão ser totalmente distintas, isto é, motor/bomba independente da turbina/gerador.

3.5 - As máquinas hidráulicas reversíveis (B/T) de simples estágio utilizadas nas (UR) podem ter potência, por unidade, de vá-

rias centenas de Mw. Alguns exemplos:- na Europa há máquinas reversíveis de simples estágio de 40 Mw a 260 Mw; a (UR) de Oku Tataragi, Japão, tem 2 unidades de 310 Mw, funcionando com 406m de queda, 300 rpm. Está em operação desde 1974; a (UR) de Raccoon Mountain, nos EUA, possui 4 unidades reversíveis de simples estágio com 382,5 Mw cada, 310m de queda, vazão de bombeamento variando de 370 m³/s a 510 m³/s, vazão média de turbinamento de 600 m³/s; a (UR) de Ludington, EUA, tem 6 grupos reversíveis com 343 Mw de potência, carga de 108m, 113 rpm. Está em operação desde 1973; a (UR) de Numappara, Japão, possui 3 grupos reversíveis com 230 Mw cada, 500m de queda e 375 rpm. Opera desde 1973; a (UR) de Bath County, EUA, é constituída por 6 unidades reversíveis de simples estágios com 457 Mw cada, queda de 384m, 257 rpm. Opera desde 1974; a (UR) de Bremm, na Alemanha Ocidental, prevê unidades com 800 Mw de potência, queda de 200 a 250m, 125 rpm. Serão as unidades de maior potência do mundo.

3.6 - A localização da (UR) depende de várias circunstâncias. As mais importantes são:- facilidades topo-geológicas e de acesso; utilização de facilidades provenientes de outras Usinas Hidrelétricas e/ou Geradoras convencionais ou de outros aproveitamentos de água, visando principalmente o uso de reservatórios existentes; proximidade de grandes centros de consumo e de geração de energia. Atualmente esboça-se a tendência de realizar Centros de Geração em que diferentes tipos de geração (Usinas Térmica e Nuclear, Usina Hidrelétrica Convencional e Usina Reversível) são implantados próximos uns dos outros, com isso obtendo-se grandes vantagens operacionais e econômicas; proximidade de grandes troncos distribuidores de energia; aproveitamento de lagos naturais, cavernas naturais ou artificiais (minas abandonadas) e formações topo-geológicas naturais (vales e depressões) visando minimizar custos de implantação. Isto porque o problema do consumo de água para operar a (UR) é de menor significação (a água vai e volta), fato que não acontece nas Usinas Hidrelétricas convencionais que depende fundamentalmente da existência de recursos hídricos em escoamento unidirecional e contínuo.

3.7 - O custo de implantação das (UR) depende das facilidades que poderão ser aproveitadas e varia com a queda e com a capacidade instalada. Por quilowatt instalado esse custo varia em ra-

zão inversa com a queda e com a capacidade instalada. Para potência de 1.000 Mw, tal custo varia de 180 US\$/Kw para 250m de queda a cerca de 90 US\$/Kw para 1.250m de queda. Para Usinas maiores, com 3.000 Mw, esses custos unitários variam de 160 US\$/Kw a 75 US\$/Kw entre os mesmos limites de queda (junho de 1974). Em 1976 tais custos unitários estavam sendo referidos como variante entre 200 a 250 dólares por Kw instalado para (UR) a céu aberto e 200 a 300 dólares para (UR) subterrânea, com capacidade instalada respectivamente de 3.000 Mw e 1.000 Mw.

3.8 - O predimensionamento hidráulico, em nível de anteprojeto, de (UR) de regularização horária deve atender ao seguinte esquema de cálculo (ILUSTRAÇÃO 3.8-1) que fornece resultados aproximados:-

a - potência de bombeamento:-

$$(PB) = 1000(QB)(HB)/75 (rB) \text{ em HP}$$

b - potência de turbinamento:-

$$(PT) = 1000(QT)(HT)(rT)/75 \text{ em HP}$$

c - energia consumida no bombeamento:-

$$(EB) = (PB) \times (TB)$$

d - energia gerada no turbinamento:-

$$(ET) = (PT) \times (TT)$$

e - relação entre os tempos de operação:-

$$24 \text{ horas} = (TB) + (TT) \text{ seja } (TB) \approx 1,2(TT)$$

f - volume útil médio (estimado) do reservatório superior alimentado exclusivamente pelo bombeamento e não havendo saídas d'água para outros usos:-

$$(VS) = (QB) \times (TB)$$

g - volume útil estimado (médio) do reservatório inferior:- depende do regime do recurso hídrico a ser aproveitado. Caso a (UR) seja hidrologicamente isolada, isto é, recalque e turbiñe a mesma massa d'água (perda d'água teoricamente nula) é claro que (VS) = (VI) sendo (VI) = (QT)x(TT) o que conduz a:-

$$(QT)/(QB) = (TB)/(TT) = 1,2$$

h - rendimento da instalação:-

$$(rI) = (PT)/(PB)$$

costuma variar entre 65% e 80%, dependendo fundamentalmente das extensões L dos condutos (quanto menor L maior o rendimento) e das características das máquinas hidráulicas e elétricas que ho

je em dia estão muito aperfeiçoadas.

i - rendimento energético:-

$$(rE) = (ET)/(EB)$$

No caso de potências uniformes durante a operação e sendo a (UR) convencional:-

$$(rE) = (PT)(TT)/(PB)(TB) = (r1)/1,2$$

Caso o bombeamento e turbinamento sejam variáveis com o tempo (isto é o que acontece na prática), o rendimento energético deverá levar em conta esse fato.

j - diâmetro dos condutos inferior e superior:- depende da velocidade dos escoamentos e leva em conta a vazão turbinada ser maior do que a bombeada. Daí o dimensionamento dos condutos normalmente, ser realizado para as condições de turbinamento, com velocidade de escoamento tanto maior quanto menor a extensão L do conduto.

k - cota de instalação do grupo Bomba/Turbina:- é fixada levando em conta não haver cavitação e vibração. Tal condição, para a situação mais desfavorável de bombeamento, obriga a maiores afoamentos, fato que não traz maiores dificuldades práticas quando a Casa de Força é subterrânea (situação mais frequente).

l - os reservatórios inferior e superior devem ser estudados e dimensionados pelos métodos hidrológicos convencionais considerando-se a acumulação do Volume Útil necessário. Os problemas sedimentológicos e ecológicos costumam ser considerados como de maior significação, embora nas Usinas Hidrelétricas convencionais tais aspectos sejam mais sérios e de solução mais difícil e onerosa.

m - as estruturas de controle de vazão nos condutos da (UR) e que são implantadas nos reservatórios inferior a superior são de importância capital para o bom desempenho do sistema hidráulico. Funcionam ora como tomada d'água, ora como estruturas de reposição de vazões. Devem ser estudadas em modelo reduzido.

4 - A ÊNFASE AO BOMBEAMENTO NAS USINAS REVERSÍVEIS

4.1 - Na ILUSTRAÇÃO 4.1-1 vê-se o perfil típico de Usina Reversível cujo Reservatório Superior também funciona como Caixa de Partida para Vazões (QU), em cotas altas, visando gerar benefícios de outras naturezas tais como:- abastecimento d'água de cidades e industriais, irrigação de glebas, transposição de deflú

vios para outras bacias hidrográficas (exportação de vazões) etc. Nessa situação a (UR), além de atender aos aspectos energéticos já referidos (geração de energia de ponta), tem a função de enfatizar os bombeamentos levando em conta a geração de outros benefícios tangíveis e principalmente intangíveis, benefícios esses que obrigam a elevações de massas d'água a cotas mais elevadas para atender a outros sistemas de utilização da água útil. Em outras palavras a (UR), na fase de bombeamento, deverá recar a vazão normal de operação, além da vazão (QU) que se destina a outros usos não energéticos, funcionando assim como uma UGBP (Usina de Bombeamento de Grande Porte).

4.2 - Vejamos alguns exemplos:- a Grand Coulee Pumping Plant, EUA, foi projetada para elevar vazões do reservatório Franklin D. Roosevelt para o reservatório Banks visando a irrigação de glebas. A altura de elevação varia de 81m a 111m tendo sido projetados 12 grupos motor-bomba dos quais 6 foram instalados em uma primeira etapa e os 6 restantes, a entidade projetista (Bureau of Reclamation), resolveu recentemente substituir (razões econômicas) por grupos bomba/turbinas Francis de simples estágio. Deste 6 grupos estão em operação 2 grupos B/T com 200 rpm, cada unidade bombeando $48 \text{ m}^3/\text{s}$ (média) e turbinando a vazão máxima de $70 \text{ m}^3/\text{s}$, havendo um conduto por unidade com cerca de 4m de diâmetro. É interessante notar que a chegada das vazões bombeadas em cota elevada se dá na extremidade de um canal adutor convencional (escoando nos 2 sentidos) com cerca de 3 quilômetros de extensão, o qual se lança no reservatório Banks (em cota superior), onde se situa a tomada d'água para os sistemas de irrigação por gravidade; a Northfield Mountain Hydroelectric Pumped Storage Plant, com 4 unidades B/T tipo Francis de simples estágio, 250 Mw por unidade (1.000 Mw total). Essa (UR), além de reforçar a ponta do sistema gerador, tem também o objetivo de promover a elevação de aproximadamente $20 \text{ m}^3/\text{s}$ de água no rio Connecticut para o reservatório Quabbin destinado a atender ao abastecimento d'água de Massachusetts, USA; visando a dupla finalidade de promover energia de ponta e elevar vazões do rio S. Francisco ($50 \text{ m}^3/\text{s}$) para perenizar os rios Jaguaribe, Piranhas e Paraíba do Norte, há estudo preliminar de pré-viabilidade que mostra ser possível realizar a recuperação hidrológica destas três grandes bacias do nordeste brasi

leiro com a implantação de Usinas Reversíveis na serra Talhada e na Chapada do Araripe com as seguintes características aproximadas (ILUSTRAÇÃO 4.2-1):-

a) (UR) da Chapada do Araripe:- capacidade instalada de 1.300 Mw; rendimento da instalação de 62%; rendimento energético de 43%; altura de elevação de 320m; vazão de bombeamento de 205 m³/s; vazão de turbinamento de 230 m³/s. Finalidade:- geração de energia de ponta de cerca de $2,9 \times 10^9$ kwh/aa para o sistema CHESF e perenização do alto Jaguaribe e do Piranhas.

b) (UR) da Serra Talhada:- capacidade instalada de 1.200 Mw; rendimento da instalação de 63%; rendimento energético de 45%; altura de elevação de cerca de 300m; vazão de bombeamento de 255 m³/s; vazão de turbinamento de 334 m³/s. Finalidade:- geração de energia de ponta de $2,7 \times 10^9$ kwh/aa para o sistema CHESF e perenização do Paraíba do Norte. Note-se que essas (UR) se localizam próximo ao tronco de transmissão de energia de Fortaleza. Os números acima referidos poderão sofrer alterações ditadas por estudos mais detalhados.

4.3 - No caso da (UR) atender também a bombeamentos de vazões (QU) destinadas a outras finalidades não energéticas (superbombeamentos), convém analisar o aspecto econômico do empreendimento de acordo com os seguintes conceitos básicos relacionados a custos atuais:-

4.3.1 - o custo do capital; deverá considerar a implantação de todo o sistema hidráulico:- a (UR) em si e mais os circuitos hidráulicos não energéticos que dependem do superbombeamento desta (UR) (irrigação, abastecimento d'água, exportações de vazões, etc.), e que geram outros tipos de benefícios;

4.3.2 - o custo OMC (operação, manutenção e conservação); será previsto para o conjunto de sistemas hidráulicos (UR e mais os não energéticos);

4.3.3 - o custo de energia, será determinado considerando a operação da (UR), isto é:-

$$(CE) = (ET)(tT) - (EB)(tB) \quad \text{onde:-} \quad (1)$$

(CE) = custo anual de energia na (UR); (ET) = energia gerada (turbinagem) ao ano; (tT) = tarifa média de geração (tarifa de ponta); (EB) = energia consumida (bombeamento) ao ano; (tB) = ta-

rifa média noturna (t_{srifa} de base).

4.4 - A expressão (1) pode ser transformada em:-

$$(CE) = (t_B) \times (ET) \times (n - K) \quad \text{onde:-}$$

$$n = (t_T)/(t_B) > 1$$

$$K = (EB)/(ET) = 1/(rE) > 1$$

4.5 - Com o intuito de procurar anular o custo de energia, parcela de significação especial nesse tipo de superbombeamento, é aconselhável que se procure estabelecer as tarifas de fornecimento de energia à UR (bombeamento noturno) e de venda de energia de ponta (turbinamento nas horas de demanda máxima) de modo a atender a relação abaixo definida:-

$$n = K \quad \text{ou} \quad (t_T) \times (ET) = (t_B) \times (EE)$$

isto é, a tarifa de geração de ponta da (UR) deverá ser n vezes maior do que a tarifa de consumo (bombeamento) sendo n , no caso, o inverso do rendimento energético do sistema.

4.6 - Nesta situação, a venda de energia produzida durante a geração de ponta da (UR) compensará a compra de energia de consumo necessária a realizar o bombeamento noturno, o que significará uma tripla vantagem:- o mercado consumidor de energia se beneficiará face ao atendimento da demanda de ponta (problema operacional dos mais importantes nos sistemas de distribuição de energia); anular-se-á o custo de energia na realização do superbombeamento, fato que representa substancial redução nas despesas de custeio das (UR); facilitará a implantação de outros sistemas hidráulicos não energéticos tais como:- abastecimento d'água de cidades e indústrias, irrigação, exportação de vazões para bacias carentes etc., que utilizando os deflúvios (QU) bombeados, irão promover outras formas de benefícios tangíveis e intangíveis.

4.7 - Caso $n > K$ isto quer dizer que a tarifa de ponta ou o rendimento energético do sistema, favorecem a obtenção de um benefício residual de natureza energética, o qual deverá ser acrescido dos outros benefícios (tangíveis e/ou intangíveis) de natureza não energética,

4.8 - Caso $n < K$, o valor da tarifa de ponta (menor) ou o rendimento energético do sistema (menor) são insuficientes para anular o custo de energia. Nesse caso haverá um custo residual de energia que deverá acrescer as outras despesas de custeio.

4.9 - Os benefícios gerados pelo empreendimento (UR mais sistemas não gerador de energia) representam o aspecto de maior preocupação econômica. Se a destinação da fração (QU) da vazão bombeada pela (UR) for para produção de benefícios tangíveis (m^3 de água para abastecimento de cidades e indústrias, m^3 de água para irrigação de glebas, etc.), é fácil determinar-se o valor, em dinheiro, desses benefícios anuais.

4.10 - Caso essa fração (QU) seja exportada para outras bacias hidrográficas próximas (transposição de vazões), o cálculo dos benefícios dependerá de uma série de circunstâncias de quantificação mais complexa se bem que de fácil qualificação. Há assim, além dos benefícios tangíveis, a consideração dos benefícios intangíveis que poderão ser fundamentais para a tomada de decisão final.

5 - AS USINAS REVERSÍVEIS E A RECUPERAÇÃO DAS BACIAS CARENTES

5.1 - As bacias hidrográficas carentes, por definição, são aquelas que dispõem de deflúvios próprios incapazes de gerarem benefícios sócio-econômicos com a permanência e segurança necessárias. Tendo recursos hídricos insuficientes, e havendo, ainda mais, remanejamentos inadequados de tais disponibilidades em água (não consideração dos princípios básicos de economia hídrica), como consequência disso, grandes áreas dessas bacias são gradativamente depauperadas a ponto de os poucos recursos em água disponíveis se tornarem insuficientes para atuações econômicas normais, situação que pode afetar a própria sobrevivência do homem. Esses fatores negativos tendem a recrudescer e se transformam, por vezes, em verdadeiras catástrofes, quando situações hidrometeorológicas ainda mais desfavoráveis (períodos secos) conduzem a grandes perdas de bens econômicos e geram fenômenos sociais altamente prejudiciais, o que entrava o progresso e o desenvolvimento regional com reflexos nocivos à economia nacional.

5.2 - O importante problema da valorização de bacias hidrográficas carentes visando gerar benefícios e sobretudo implantar definitivamente o homem à terra, é preocupação prioritária do Governo conforme inferimos de recentes declarações do Ministro do Interior reportando-se às secas que persistem em assolar o nor-

deste do Brasil (abril-maio/1979), justamente nas regiões situadas nos vales do alto e médio Jaguaribe, Piranhas e Paraíba do Norte.

5.3 - Justamente nessa macro-região do País de algumas centenas de milhares de quilômetros quadrados (parte do polígono das secas), os índices pluviométricos são deficientes e os cursos d'água são de regime cortado. As bacias hidrográficas são carentes e não sabemos da existência de estudos técnicos indicativos da preocupação de remanejar a pouca água existente (que além disso é distribuída muito irregularmente no tempo) levando em conta aspectos relacionados a economia hídrica espacial. De nosso conhecimento a realização de estudos de regularização pontuais, onde a preocupação dominante do projetista consiste, não em economizar os poucos recursos naturais em água, mas em aproveitá-los num determinado local da bacia, de maneira regular (reservatórios de estiagem), através do conceito de máxima vazão regularizável, conceito esse que conduz a elevadas perdas de água (para o clima do nordeste). Tal política de uso e disciplinamento da água disponível nessas áreas, vem se mostrando ineficiente como provam os períodos de seca que continuam a acontecer no nordeste brasileiro, problema que representa motivo de preocupação desde os tempos do Império.

5.4 - A solução definitiva desta situação desfavorável que vem obrigando o País a dispendar bilhões e bilhões de dólares com resultados parciais duvidosos no que diz respeito aos aspectos fundamentais da economia hídrica regional (se bem que reconheçamos méritos em outros aspectos significativos), tal solução definitiva, repetimos, será obtida com a perenização adequada dos principais eixos de escoamento fluviais do nordeste. Assim será possível prever e realizar benefícios diretos e indiretos que irão dinamizar a economia regional de forma permanente e com a segurança operacional necessária. A fixação do homem à terra será mera consequência, fortalecida, sem dúvida pela, tendência inata do nordestino em enraizar-se em seus pagos e de valorizar e amar as glebas onde vive e trabalha. Além desses aspectos, há que se considerar os benefícios intangíveis que poderão ser qualificados com facilidade, os quais provêm da razão principal rela

cionada à fixação do homem à região (núcleos populacionais florescentes, melhoria da saúde pública, maiores trocas comerciais, diversificação social mais justa e equitativa, melhor produtividade das terras, melhoria do clima e da paisagem, melhor capacidade de produção, melhoria da qualidade dos solos, implantação de cobertura florística natural, valorização piscícola e das terras marginais aos eixos de escoamento perene, valorização ecológica regional, etc.). Com o passar do tempo tais benefícios se refletirão na valorização sócio-econômica e nos índices de produtividade dos diferentes níveis mercadológicos regionais.

5.5 - A perenização dos principais cursos d'água de regime cortado do nordeste brasileiro, vem sendo indicada há tempos como solução definitiva para o problema das secas. Euclides da Cunha (que consideramos como patrono da engenharia hidráulica e da ecologia brasileiras) pensava em transferir vazões do São Francisco para o Jaguaribe visando sua perenização; talvez tenha sido o primeiro engenheiro a apresentar idéias concretas sobre o assunto.

5.6 - É fora de dúvidas (exemplos nos EUA, Rússia, México, Brasil, etc.) ser perfeitamente viável, técnica e economicamente, a realização de exportação de vazões disponíveis de bacias hidrográficas fornecedoras de deflúvios, para bacias carentes, importadoras, desde que as "sangrias" hídricas realizadas não causem problemas.

5.7 - Tais remanejamentos de vazões obrigam à transposição de vazões através de divisores de água que separam as bacias exportadora e importadora de deflúvios. Os locais de transposição nos divisores e as áreas de tomada d'água na bacia exportadora e de injeção de água na importadora, constituem problemas hidráulicos e hidrológicos que deverão ser estudados judiciosamente. De acordo com esse conceito é possível realizar a perenização dos principais cursos d'água de regime cortado do nordeste através da transposição de vazões importadas de bacias próximas (São Francisco, Tocantins, Parnaíba), sendo os deflúvios do rio São Francisco, apesar de seu uso bastante comprometido, a disponibilidade hídrica mais promissora.

5.8 - Desde que o Governo considere politicamente viável dar so

lução definitiva ao controle das secas no nordeste, os orçamentos federais (Secretaria de Planejamento, Ministério do Interior, Ministério de Minas e Energia) poderão atender ao custo do capital do empreendimento (ou pelo menos parte dele), sendo o custeio do mesmo garantido pelos benefícios gerados a curto, médio e longo prazo. Teríamos assim o caso típico de um Empreendimento Pioneiro, semelhantes a vários implantados no País como: - Hidrelétrica de Paulo Afonso, Hidrelétrica de Boa Esperança, rodovia Transamazônica e tantos outros que vem realizando magnífica atuação com o objetivo de propiciar progresso e desenvolvimento ao Brasil.

5.9 - A solução do problema da exportação de vazões de uma bacia para outra poderá ser: - por gravidade, unicamente, o que obrigará a construção de barragens custosas, túneis, tomadas d'água, canalizações e reposição de vazões, obras essas que costumam ser custosas. Essa solução tem sido aventada por vários técnicos, tendo sido até agora considerada economicamente inviável; por bombeamento simples, utilizando Usinas de Bombeamento de Grande Porte (UBGP), tal como exemplifica o projeto Grand Coulee Pumping Plant, EUA, já referido. O custo de energia costuma ser elevado, o que pode tornar essa solução pouco vantajosa economicamente; através de Usinas Reversíveis (UR), impondo-se superbombeamentos com o objetivo não só de atender a operação normal da (UR) como também garantindo o recalque das vazões de exportação (QU) que serão transpostas, indo reforçar as bacias carentes. Essa solução, por outro lado, costuma conduzir a benefícios apreciáveis à geração de energia, desde que as condições de mercado sejam favoráveis.

5.10 - A guiza de ilustração, sem a veleidade de precisão de resultados numéricos, apresentamos estudo comparativo entre algumas ALTERNATIVAS de projeto (I, II e III), uma baseada na transposição de vazões entre bacias por simples bombeamento (ALTERNATIVA I), e as duas outras com emprego de (UR). Suponhamos que se pretenda exportar a vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ por unidade de bombeamento, sendo a altura geométrica de recalque de 125m (condições aproximadas do Grand Coulee Pumping Plant):-

5.10.1 - no caso da ALTERNATIVA I definida por Bombeamento Simples (UBGP), chegar-se-á ao seguinte resultado:- Potência consu

mida por unidade de bombeamento = 87.000 Kw; Energia consumida em 6 meses ao ano de operação contínua (período de estiagem) = 376×10^6 kwh/aa; Custo de implantação a razão de US\$ 200,00 por kw instalado = 17,4 milhões de dólares; Custo anual de operação, manutenção e conservação (OMC) de 3% do custo de implantação, seja = 0,5 milhões de dólares ao ano; Custo do capital durante o horizonte de projeto de 25 anos com valor do dinheiro de 10% a.a. = 1,9 milhões de dólares ao ano; Custo de energia à tarifa média de US\$ 0,02/kwh em 24 horas de bombeamento diário = 7,5 milhões de dólares ao ano. Com os números acima o custeio desta ALTERNATIVA I será (amortização + OMC + custo de energia) igual a 9,9 milhões de dólares ao ano destinados somente a realizar o recalque de (QU) = $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Note-se a importância da parcela referente ao custo de energia que representa três quartas partes das despesas de custeio, embora o custo de implantação seja acessível;

5.10.2 - suponhamos a ALTERNATIVA II de projeto utilizando Usina Reversível (UR) com superbombeamento de (QU) = $50 \text{ m}^3/\text{s}$, vazão essa destinada a exportação para atender, por exemplo, a perenização de bacias carentes. Os resultados numéricos serão os seguintes (cálculo aproximado):- Potência consumida (bombeamento) = 173.000 kw; Potência de ponta fornecida (11 h de turbinamento por dia) = 62.000 kw; Energia consumida em 6 meses de operação com 13 h de bombeamento por dia = 611×10^6 kwh/aa; Energia fornecida durante o ano = 249×10^6 kwh/aa; rendimento da instalação = 36%; rendimento energético = 41%; Custo de implantação a razão de US\$ 300,00 por kw instalado = 51,9 milhões de dólares; Custo (OMC) a razão de 2% do custo de implantação = 1 milhão de dólares ao ano; Custo do capital em 25 anos de amortização a 10% a.a. = 5,7 milhões de dólares ao ano; Valor (compra) da tarifa de bombeamento noturno = 0,015 US\$/kwh; valor (venda) da tarifa de ponta (venda) = $k \times 0,015 = 2,45 \times 0,015 = 0,037$ US\$/kwh; Custo de energia (n = k) = zero. Com os números acima o custeio desta ALTERNATIVA II será de 6,7 milhões de dólares ao ano, com o que, realizar-se-á a exportação da vazão (QU) = $50 \text{ m}^3/\text{s}$ e a geração de 249×10^6 kwh/aa de energia de ponta para atender a demanda regional; isso por máquina reversível.

5.11 - Admitamos uma ALTERNATIVA III, onde os valores das tarifas de base (bombeamento noturno) e de ponta (geração na UR) são: - (tT) = 2 (tB). Nesse caso $n = k = 2$, o que obriga a energia de superbombeamento para recalcar a vazão (QB + QU) a cerca de 500×10^6 kwh/a.a., já que a energia gerada durante o ano pela (UR) é de cerca de 249×10^6 kwh/a.a. (62.000 kw x 11 h x 365 d). Nessa situação que consideraria o valor comercial das tarifas diferenciadas impostas pelo mercado de energia, ter-se-á o seguinte resultado final aproximado: - Energia gerada anualmente = 249×10^6 kwh/a.a.; Energia total consumida anualmente = 500×10^6 kwh/aa; Energia consumida em 6 meses de operação normal da (UR) com (TB) de 13 h/d = 201×10^6 kwh/a.a.; Energia consumida para atender ao superbombeamento de (QU) durante os restantes 6 meses do ano = 299×10^6 kwh/a.a.; Potência gerada (TT = 11 h/d) = 62.000 kw; Potência máxima absorvida (TB = 13 h/d) = 126.370 kw; Vazão total de bombeamento da (UR) = $74 \text{ m}^3/\text{s}$; Vazão de superbombeamento (QU) = $74 - 50 = 24 \text{ m}^3/\text{s}$; Rendimento da instalação = 49%; rendimento energético = 50%; Custo de implantação (300 dólares por kw) = 37,9 milhões de dólares; Custo (OMC) = 0,8 milhões de dólares ao ano; Custo do capital inicial (25 anos, 10% a.a.) = 4,2 milhões de dólares ao ano; Custo de energia = zero; Tarifa de ponta igual ao dobro da tarifa de base. Com os números acima referidos o superbombeamento (QU) = $24 \text{ m}^3/\text{s}$, é cerca da metade do valor inicialmente tomado como exemplo ($50 \text{ m}^3/\text{s}$); o custeio desta ALTERNATIVA III será de 5 milhões de dólares ao ano, solução essa que garante a exportação de vazão de $24 \text{ m}^3/\text{s}$ e a geração de 249×10^6 kwh/aa de energia de ponta, por máquina reversível instalada.

5.12 - Comparando-se os custeios (amortização do capital + OMC + custo de energia) das ALTERNATIVAS I, II e III, é fora de dúvida que a solução do superbombeamento com a utilização das Usinas Reversíveis (UR) é, de fato, a mais econômica para solucionar o problema da exportação de deflúvios quando houver necessidade de realizar recalques visando promover a transposição de vazões entre bacias. Assim sendo, a perenização das bacias hidrográficas carentes do nordeste, nas quais - repetimos - continua a imperar o problema das secas periódicas, será viável nos aspectos técnico e econômico, as custas de superbombeamentos pro

movidos através de Usinas Reversíveis. Para tal é indispensável que existam condições propícias a tal gênero de implantação, fato que acreditamos acontecer na região.

5.13 - Há que se referir, outrossim, a outro aspecto favorável que tal solução acarreta para o sistema energético regional:- o de reforçar a geração de ponta com o aproveitamento das so-bras de energia (acumulação bombeada). Assim, o mercado de energia passa a ser melhor atendido, haverá melhoria do fator de carga do sistema interligado, promover-se-á economia de á-gua (e de combustível fóssil onde existirem Termelétricas), além de outras indubitáveis vantagens para o sistema energético (geração e consumo) que atende a região beneficiada.

5.14 - Conclui-se, deste modo, que o recalque ds grandes vazões por superbombeamentos em Usinas Reversíveis, constitui solução energética de real valor, técnico, econômica e logístico capaz de realizar exportação de deflúvios visando a recuperação hidro-lógica e ecológica de bacias hidrográficas carentes. Poderá re-presentar, assim, solução definitiva para o secular problema das secas que vem entravando o progresso e o desenvolvimento sócio-econômico de extensas áreas do nordeste do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALDAZ, L. Some meteorological aspects of Northeastern Brazil's rain regime in reference to the "Seca" phenomenon. Publicação Técnica SUDENE/DEMT/WMO. Rio de Janeiro, DENET, 10, jan. 1972. 149 p. il. tab. graf.
2. ALLEN, Arthur E. Pumped-storage, Chicago, HARZA, S.d. 86 p.
3. AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, New York. Converting existing hydro-Electric dams and reservoirs into pumped-storage facilities. New York, 1974. 599 p.
4. ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO BRASIL, Rio de Janeiro, IBGE, 37:1 - 816, 1976.
5. BARROWS, H.L. Water power engineering. 3. ed. New York, Mcgran-Hill, 1943. 791 p.
6. BENSON, Manuel A. Union flood-frequency estimating methods for federal agencies. Water Resources Research, 4(5):891-999, 1968.
7. BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION. A ten year Hydro-Thermal program for the Pacific Northwest. Portland, 1969.
8. BORGES, Manfredo Cássio de Aguiar, Disponibilidades hídricas do vale do rio Jaguaribe no Estado do Ceará. Fortaleza, DNOCS, 1978. 9 p.
9. BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional da Produção Mineral. Mineral. Divisão de Águas. Seção de Hidrologia. Atlas pluviométrico do Brasil (1914-1938). Rio de Janeiro, 1948. 47 p. il. 25 mapas col. esc.1:10000000.

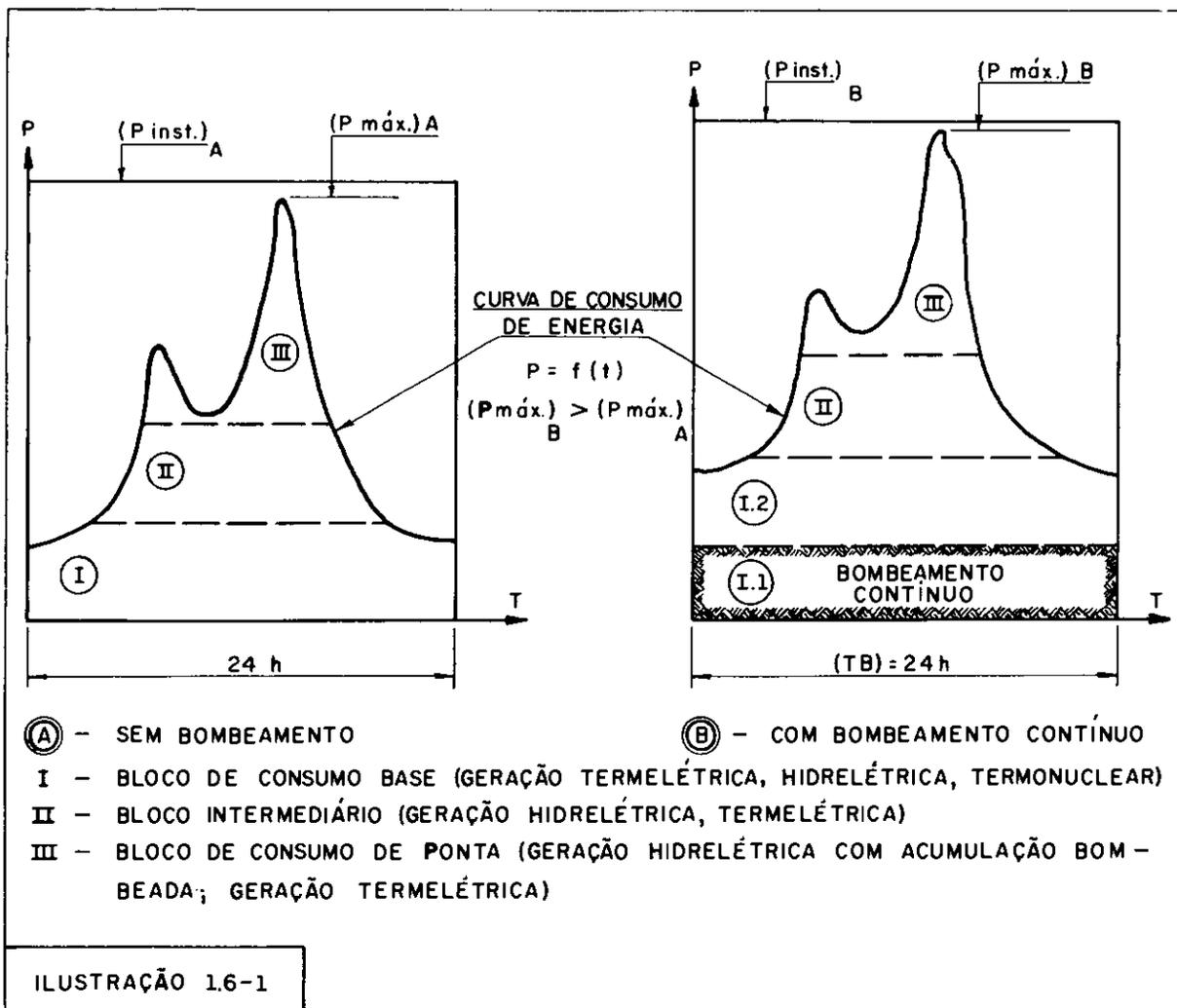
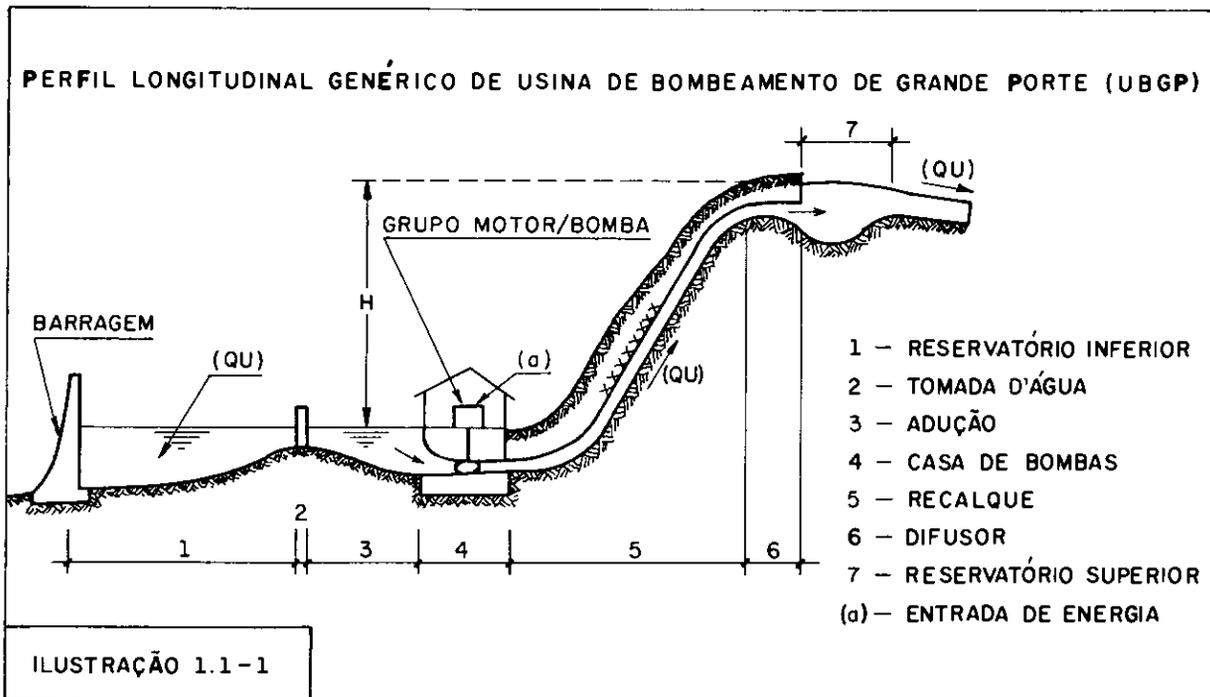
10. ———, Escritório Central de Planejamento e Controle. Escritório de Meteorologia. Atlas climatológico do Brasil; reedição de mapas selecionados, Rio de Janeiro, 1964. 100 mapas esc. 1:15.000.000.
11. ———, Mapas pluviométrico do Nordeste do Brasil. Fortaleza, 1969. 13 mapas col., esc. 1:50.000.
12. ———, Ministério do Interior. Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste. Usinas hidroelétricas reversíveis; viabilidade de sua implantação no Nordeste. Recife, 1967.
13. SRUTON, Orval W. & MITTELSTADT, Richard L. Planning for pumped-storage in a Hydro-Thermal System. ANNUAL HYDRAULICS DIVISION SPECIALTY CONFERENCE, 22, ASCE, Knoxville, 1974.
14. CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. Departamento de Tarefas e Contratos. Diretoria de Operação de Sistemas. Curso Básico sobre tarifas de energia elétrica. Rio de Janeiro, ELETROBRÁS, 1977. 61 p.
15. CHANDRAKIS, M.S. Combining pumped storage and thermal power. International Water Power and Dam Construction, 20(10):41, 1976.
16. CHEN, Henry H. Optimization of pumped-storage projects. AMERICAN POWER CONFERENCE, Chicago, 1976. Proceedings. v.38, p.1235-1243.
17. CIARLINI, Ruy Monteiro. Usina hidrelétrica reversível - novos horizontes para o planejamento dos recursos hidráulicos. Rio de Janeiro, s.ed., 1977. 28 p.

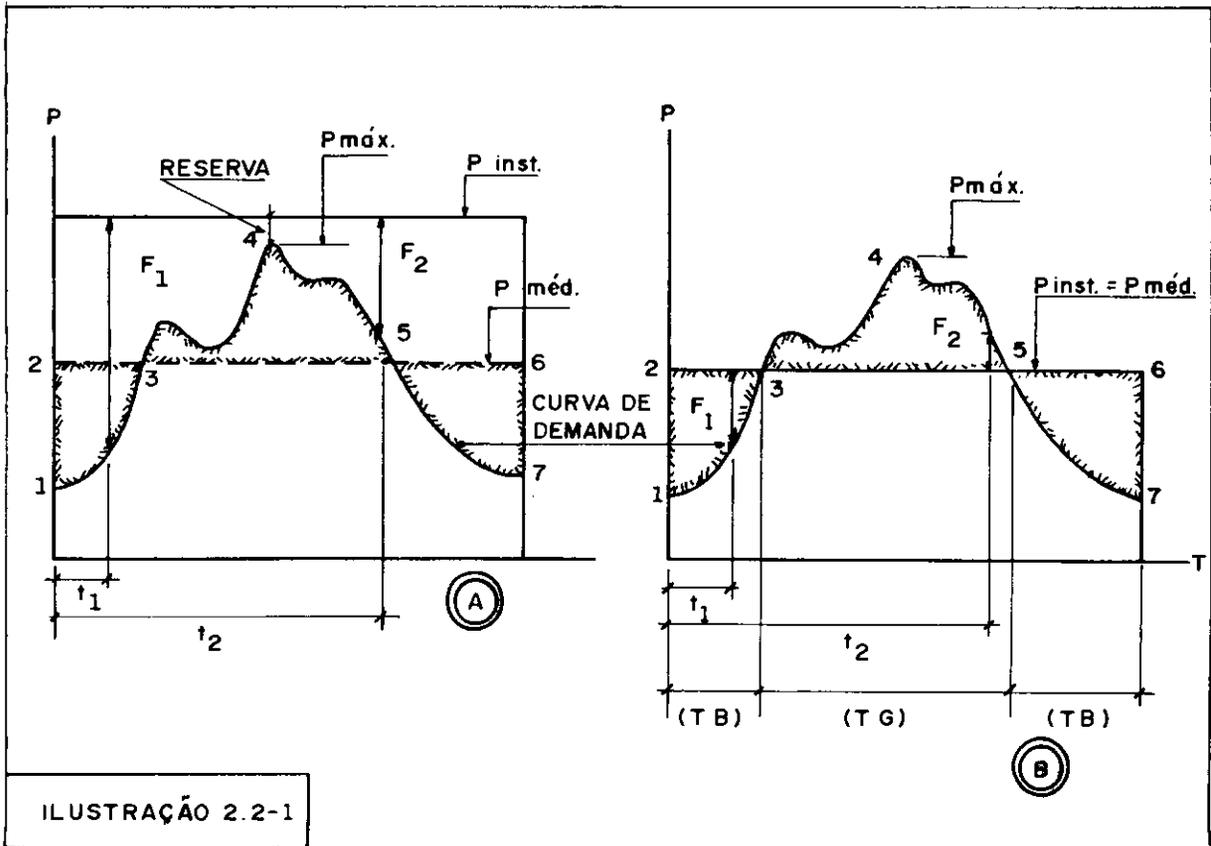
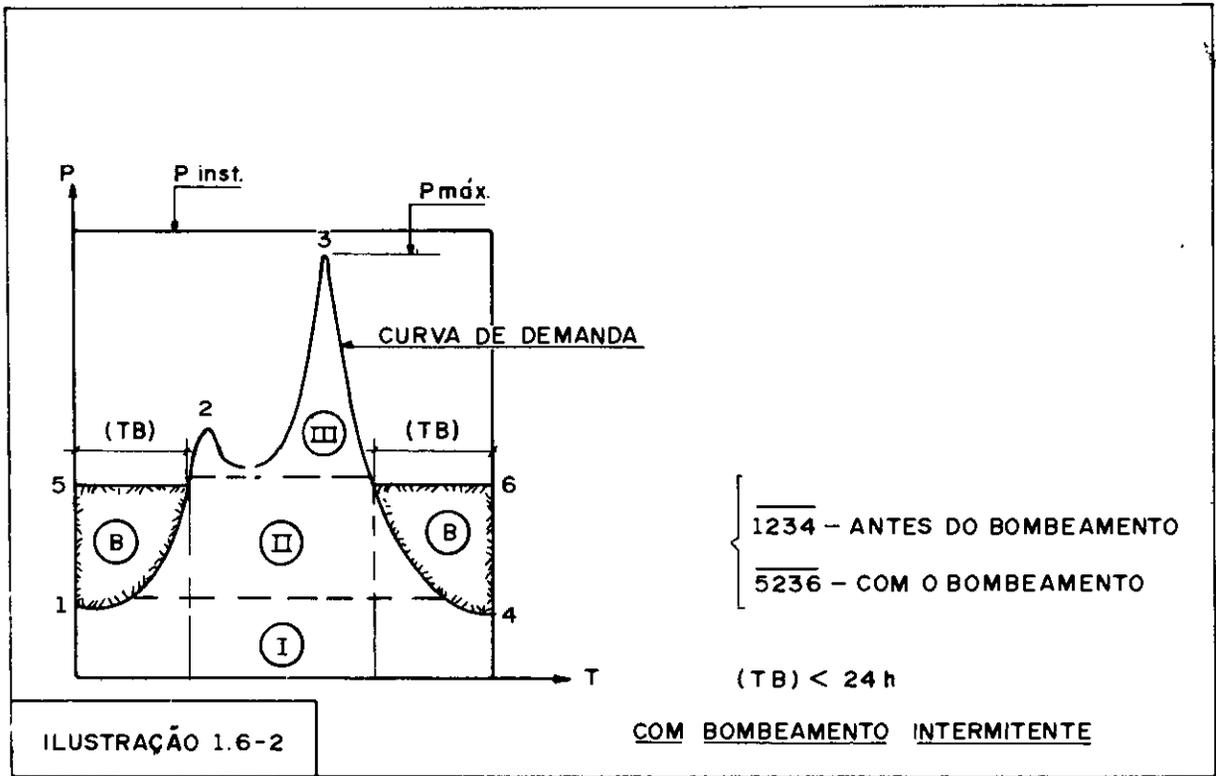
18. ENGEVIX - ESTUDOS E PROJETOS DE ENGENHARIA, Rio de Janeiro. Manual de instruções para estudos de inventário de bacia hidrográfica para aproveitamento hidroelétrico. 1977. Feito para a ELETROBRÁS. Diretoria de Planejamento e Engenharia. Departamento de Geração.
19. GERKOWSKI, Richard & DELLAS, John J. Generation challenge-sudington pumped storage. Proceedings of the ASCE. Journal of the Power Division. 104(1):99-113, et. 1978.
20. GHOSE, S.K. Hydrological studies of recent floods and droughts in Northeastern Brazil. Publicação Técnica SUDENE/DCMET/WMO. Rio de Janeiro, DEMET, 8, nov. 1971. 1 v.
21. HARZA ENGINEERING COMPANY, Chicago. Hydrologic and meteorological data - collection program Brumley gap and powell mountain pumped storage projects to Appalachian Power Company; planning memorandum. Chicago, 1978. 17 p.
22. ————. Pumped-storage. Chicago, 1977.
23. HASWELL, Charles K. Pumped-storage and tidal power in energy systems. Proceedings of the ASCE. Journal of the Power Division, 98(2): 201-220, oct. 1972.
24. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA. Departamento de Cartografia. Carta Internacional do Mundo ao Milionésimo. Rio de Janeiro, 1972. 46 mapas col.
25. JCRDÃO Filho, Wilson. Acumulação bombeada no Brasil - perspectivas. Construção Pesada, 8(88):68-77, maio 1978.
26. KEER, J.A. Usinas reversíveis e outros elementos especiais de sistema de reservatórios. SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 4., Rio de Janeiro, 1977. 57 p.

27. LAYRISHCHEV, A. Economic geographic of the USSR; general Information, geogra phy of the industry, agricultura and transport. Moscow, Progress, 1969. 379 p.
28. LIMA, Aguinaldo Rocha. Estudo para usina reversível de Caraquatuba. S.N.t. 25 f.
29. OKADA, M. et ali. Operational performance af high - head and high-speed pump-turbines. International Water Pomer and Dam Construction, 29(2):42-45, fev. 1977.
30. OTTONI NETTO, T.B. A Perenização dos rios Jaguaribe, Piranhas e Paraíba do Norte - Estudo Preliminar de Pré-Viabilidade - IV Congresso e I Amostra Nacionais de Irrigação e Drenagem. Salvador, Bahia, 1978. 52 p. 3 ilustr.
31. ————. Método de Cálculo das Disponibilidades Energéticas em Bacias Hidrográficas - Potência Hidráulica Disponível na Bacia do rio São Francisco. VI Convenção Nacional de Engenheiros, Fortaleza, Ceará, 1961. 13 p. 4 ilustr.
32. ————. Rendimento Hidrológico de Bacias Hidrográficas e a Influência dos Reservatórios de Estiagem como Fator de Perdas de Água. III Seminário Nacional de Irrigação e Drenagem. Fortaleza, Ceará, 1975. 21 p. 5 ilustr.
33. ————. Conceito de Obra Hidráulica - Barragens - Órgãos Hidráulicos de Barragens - Técnica Hidráulico-Experimental no Estudo de Barragens. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1967. 48 p. 14 est.
34. PACIFIC NORTHWEST RIVER COMMISSION, Vancouver. Pumped-storage potencial of the Pacific Northwest. Washington, 1972.

35. PUMPED storage: state-of-the-art. Proceedings of the American Society of the Civil Engineers. Journal of the Power Division, 97(3):675-695, jul. 1971.
36. REVELLE, J. Edgar & MIKITKA, Robert W. Penstocks for six pumped storage projects. Proceedings of the ASCE. Journal of the Power Division, 97(2):435-447, mar. 1971.
37. RONDON DE SOUZA, Diocles. Problemas do meio ambiente; a carência de água; formas de solução; importação de água. Rio de Janeiro, PUC, 1973. 11 p.
38. SEFCHOVICH, Eli. Condensar cooling and pumped-storage reservoirs. Proceedings of the ASCE. Journal of the Power Division, 97(3):611-621, jul. 1971.
39. SHAW, Thomas L. Integration of pumped-storage with total power. Proceedings of the ASCE. Journal of the Power Division, 97(1):159-180, jan. 1971.
40. SHEPARD, Robert E. Pumped-storage investigations in the Northwest. INTERNATIONAL CONFERENCE OF PUMPED-STORAGE DEVELOPMENT AND ITS ENVIRONMENTAL EFFECTS. Proceedings. Urbana, AWRS, 1971. p.116-23.
41. ————— & MITTELSTADT, Richard L. Computer simulation of Hourly Operation of Combined Hydro-Thermal Power Systems. AMERICAN POWER CONFERENCE. Proceedings. Illinois, Institute of Technology of Chicago, 1971. v.33. p.848-54.
42. SULIVAN Jr., Raymond K. Sizing of the pumped storage conduits. Proceedings of the ASCE. Journal of the Power Division, 97(3):667-673, jul. 1971.

43. SWIECICKI, J. Trends in pumped-turbine design. International Water Power and Dam Construction, 29(2):45-47, Feb. 1977.
44. UNITED STATES. Army Corps of Engineers. Site cost estimating procedures for pumped-storage sites. Portland, Oregon, North.
45. WILLIAMSON, J.V. Antilon lake pumped-storage project. POWER DIVISION SPECIALTY CONFERENCE, ASCE, Denver, 1974.
46. ZAGARS, A. & HAGOOD Jr., J.M. Bath country, a 2100 Mw development in the USA. Chicago, HARZA ENGINEERING COMPANY, 1977.





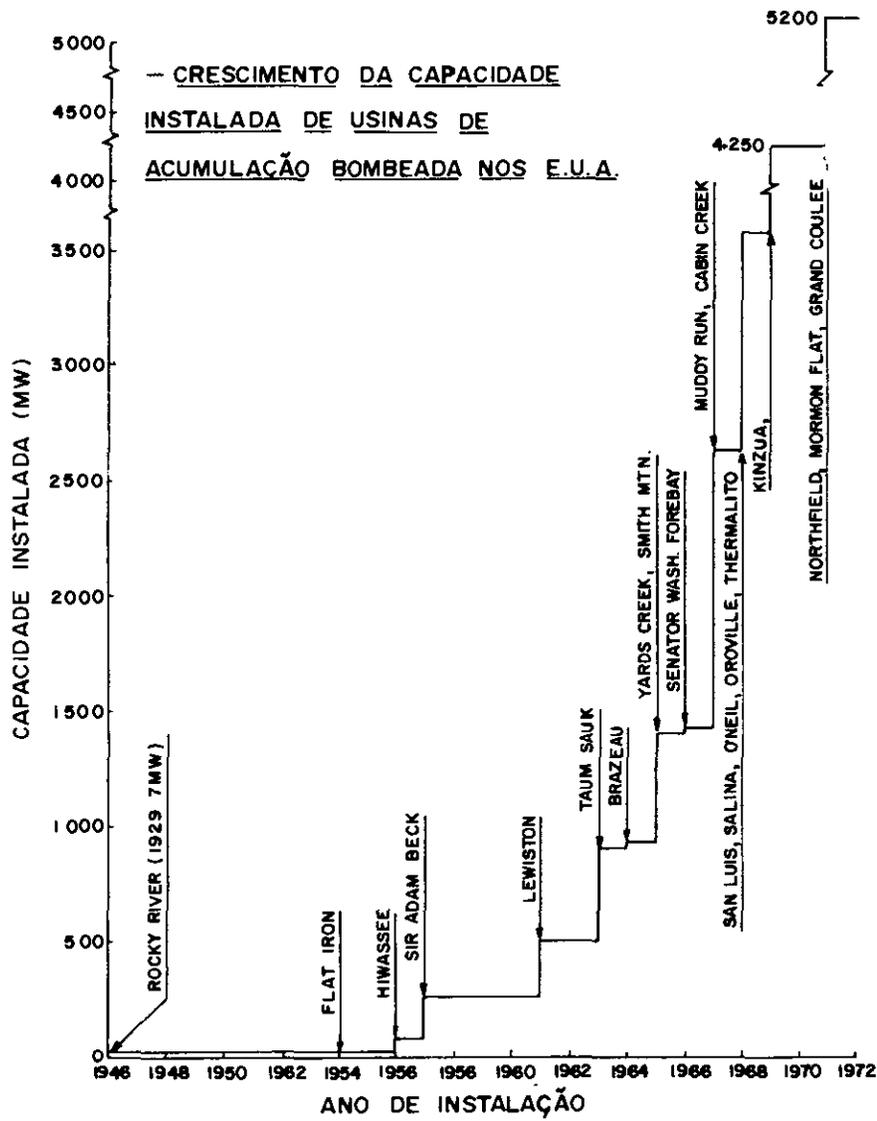


ILUSTRAÇÃO 2.13-1

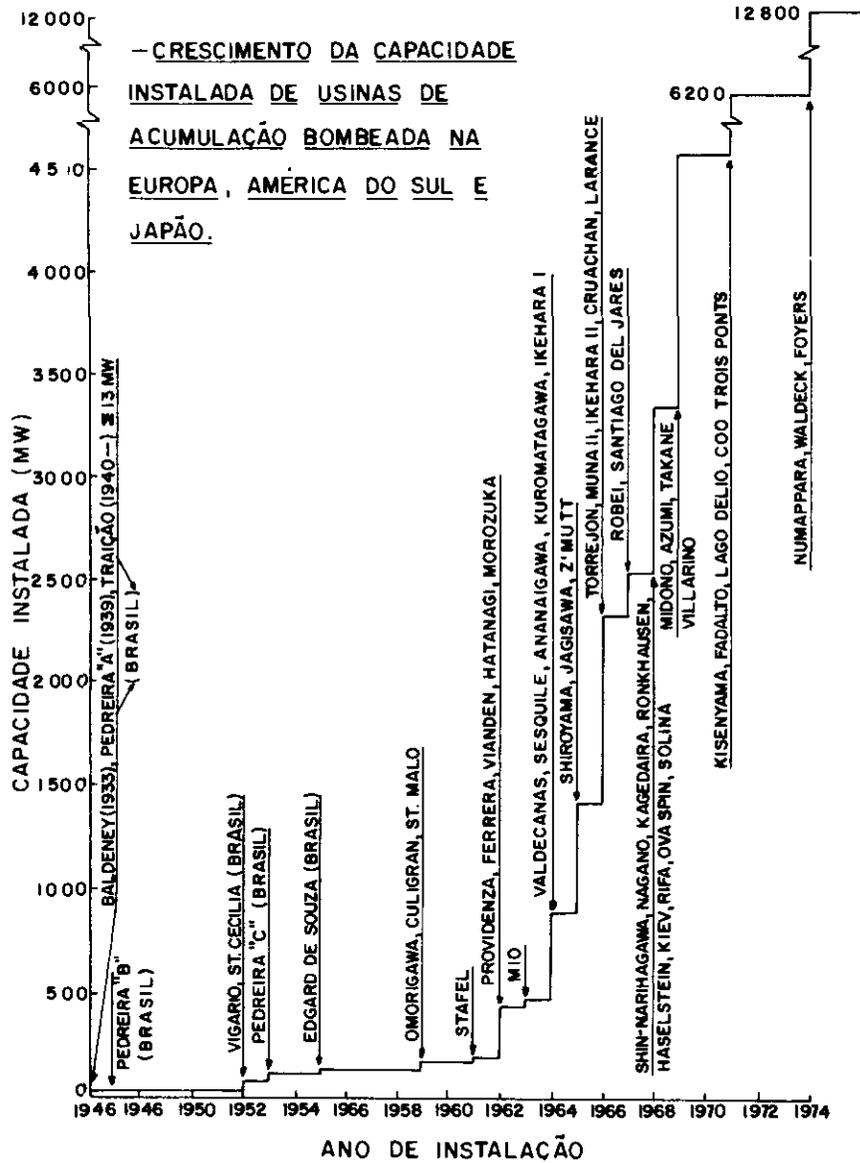


ILUSTRAÇÃO 2.13-2

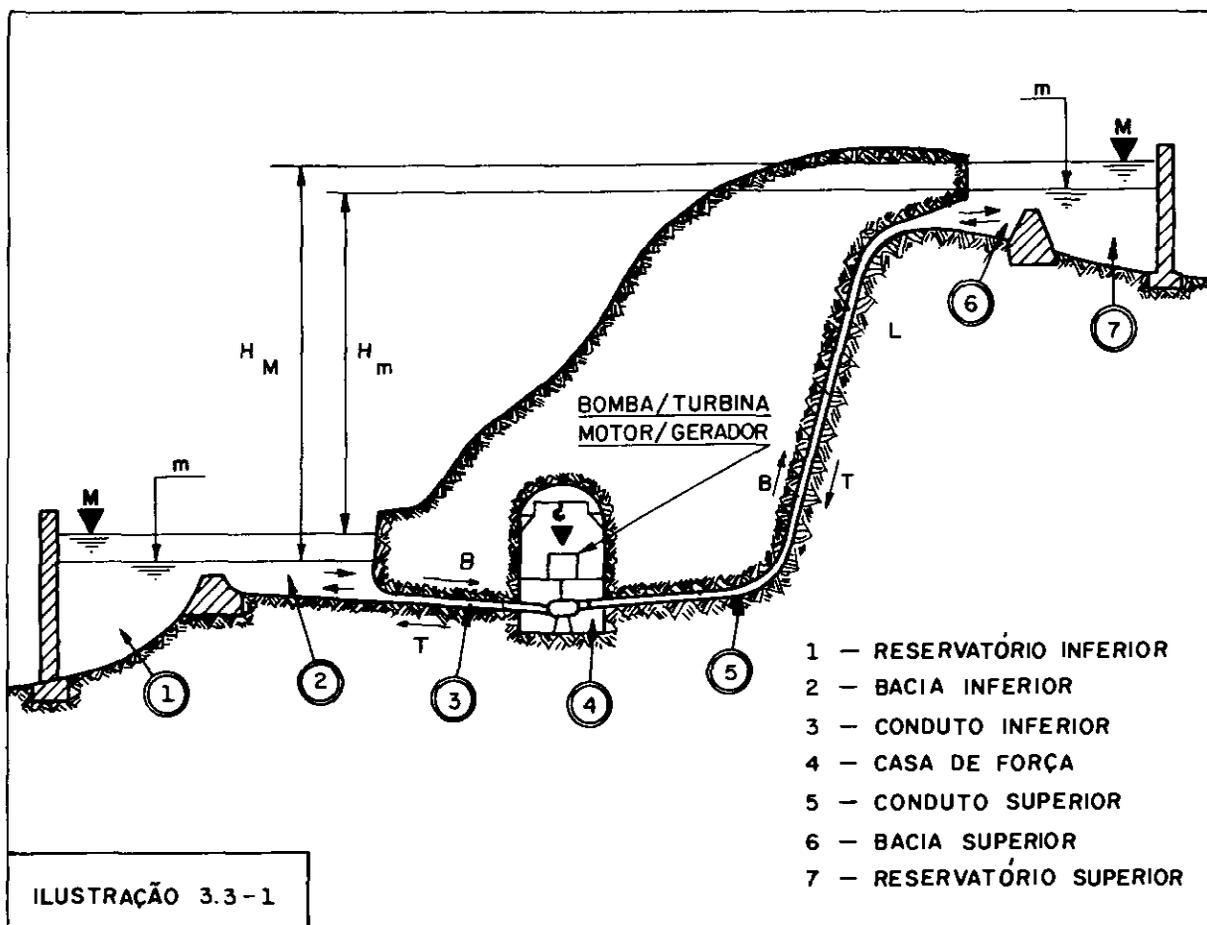
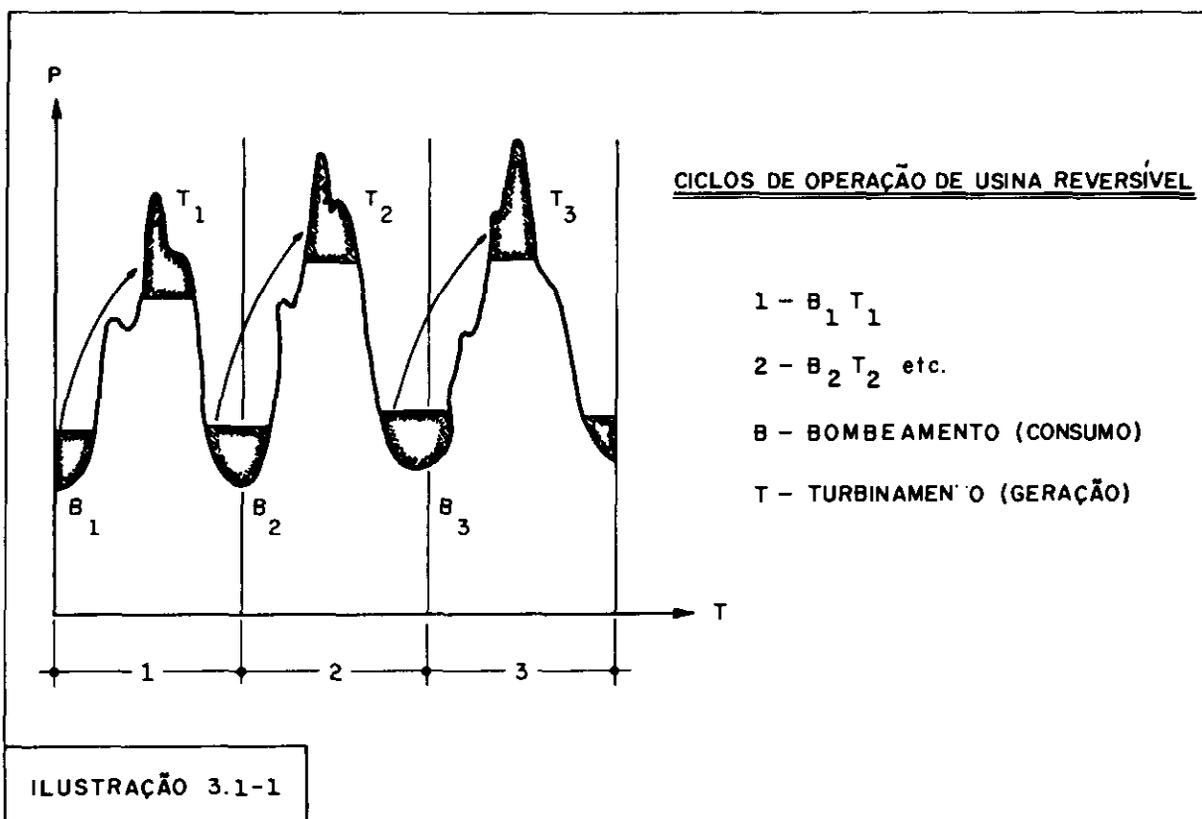
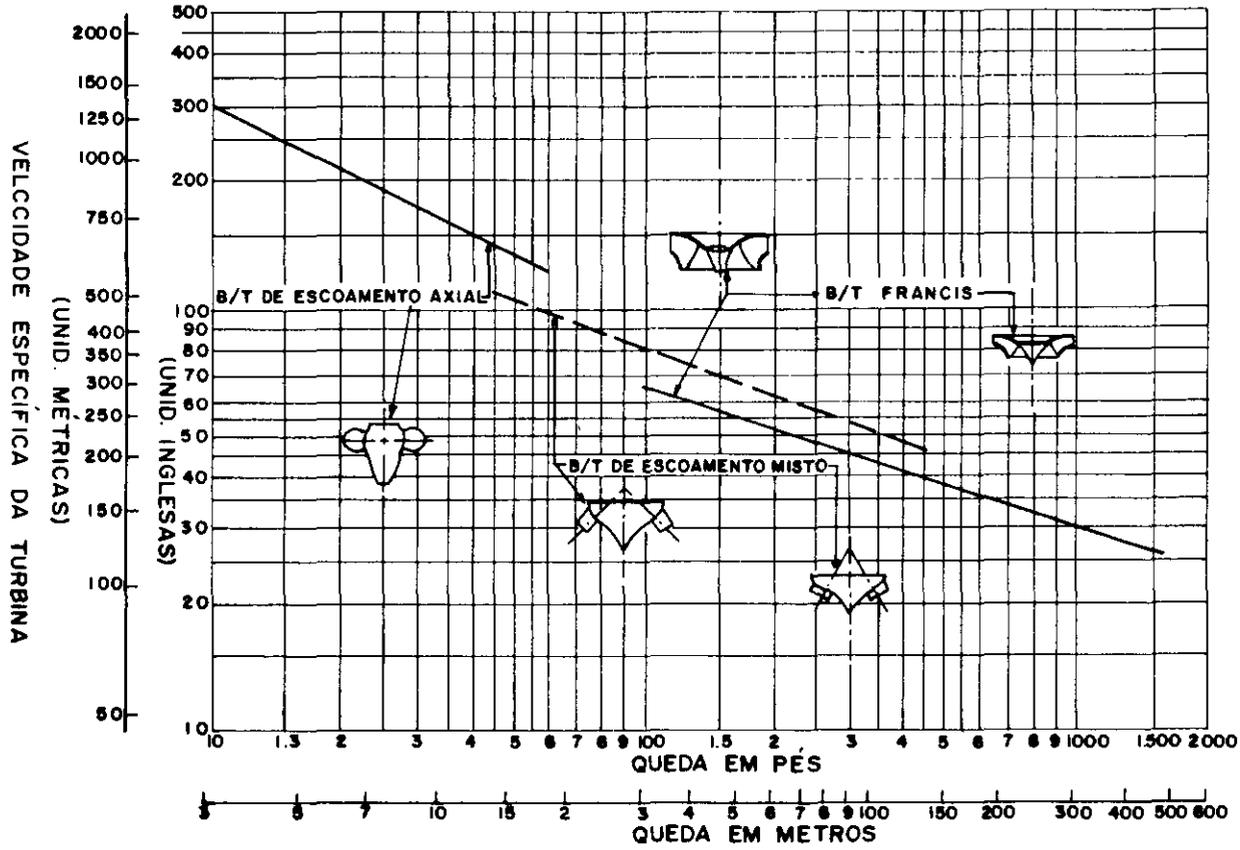


ILUSTRAÇÃO 3.4-1



ESCOLHA DO TIPO DE BOMBA-TURBINA (B/T)

TIPO DE MAQUINARIA	QUEDA LIMITE (m)	(GB) / (QT)	EFICIÊNCIA	TEMPO DE REGULAÇÃO
BOMBA/TURBINA DE SIMPLES ESTÁGIO	500 a 750	~0,80	DEPENDE DO PROJETO	LENTO
BOMBA/TURBINA DE MÚLTIPLO ESTÁGIO	1000	~0,80	DEPENDE DO PROJETO	LENTO
BOMBA DE SIMPLES ESTÁGIO E TURBINA FRANCIS, INDEPENDENTES, COM MOTOR/GERADOR COMUM A AMBAS AS MÁQUINAS.	500 a 750	DEPENDE DO PROJETO	ALTA	RÁPIDO
BOMBA DE MÚLTIPLO ESTÁGIO E TURBINA FRANCIS, INDEPENDENTES, COM MOTOR/GERADOR COMUM A AMBAS AS MÁQUINAS.	700	DEPENDE DO PROJETO	ALTA	RÁPIDO
BOMBA DE MÚLTIPLO ESTÁGIO E TURBINA PELTON, INDEPENDENTES, COM MOTOR/GERADOR COMUM A AMBAS AS MÁQUINAS.	1200	DEPENDE DO PROJETO	NORMAL	RÁPIDO
MOTOR/BOMBA E TURBINA/GERADOR INTEIRAMENTE INDEPENDENTES.	1200	DEPENDE DO PROJETO	NORMAL	RÁPIDO
QUADRO 3.4-1	TIPOS DE MAQUINARIA EM USINAS DE ACUMULAÇÃO BOMBEADA			

ILUSTRAÇÃO 4.2-1

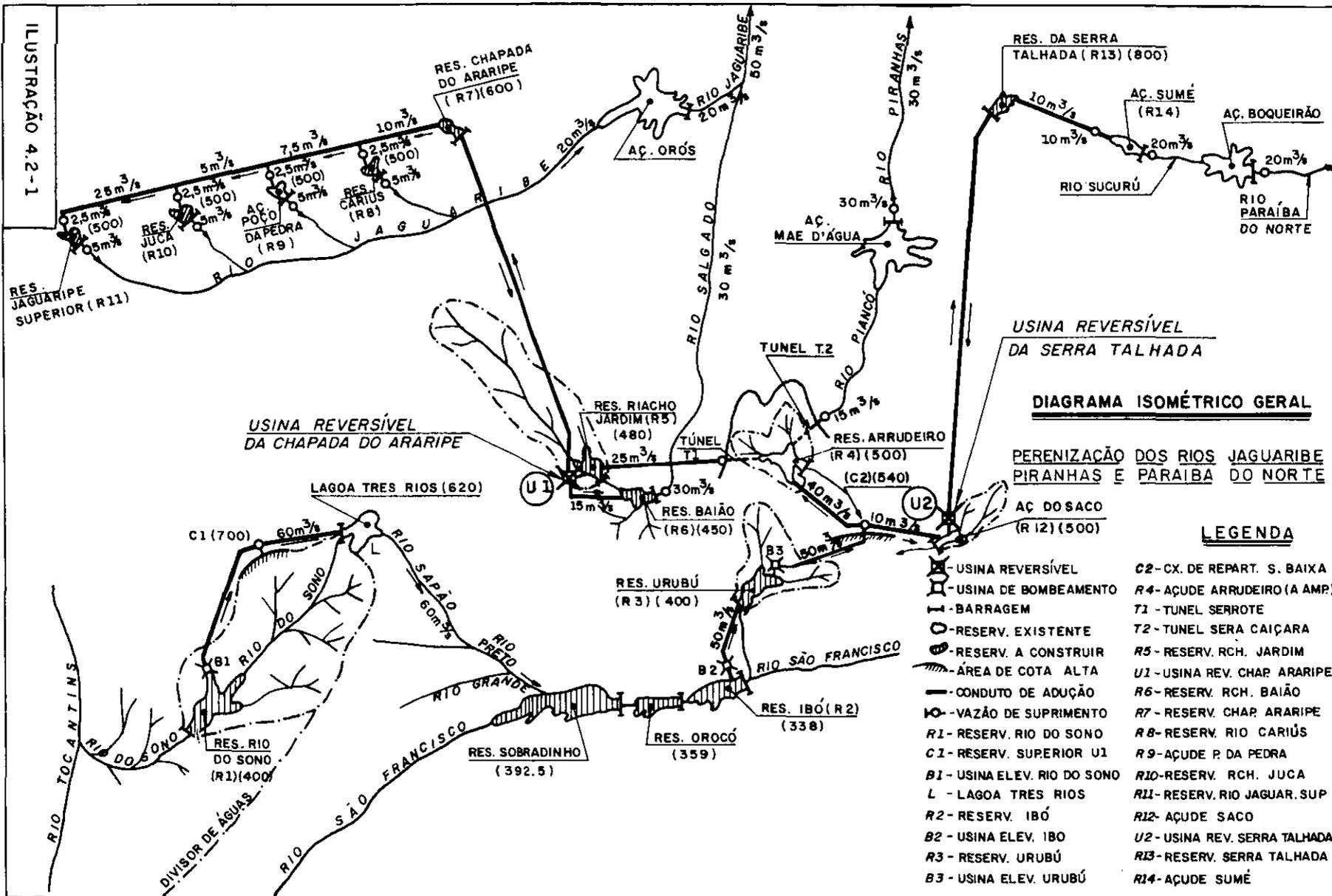


DIAGRAMA ISOMÉTRICO GERAL

PERENIZAÇÃO DOS RIOS JAGUARIBE, PIRANHAS E PARAIBA DO NORTE

LEGENDA

- ⊞ - USINA REVERSÍVEL
- ⊞ - USINA DE BOMBEAMENTO
- I - BARRAGEM
- - RESERV. EXISTENTE
- - RESERV. A CONSTRUIR
- ▨ - ÁREA DE COTA ALTA
- - CONDUITO DE ADOÇÃO
- ⊞ - VAZÃO DE SUPRIMENTO
- C1 - RESERV. RIO DO SONO
- B1 - USINA ELEV. RIO DO SONO
- L - LAGOA TRES RIOS
- R2 - RESERV. IBÓ
- B2 - USINA ELEV. IBÓ
- R3 - RESERV. URUBÚ
- B3 - USINA ELEV. URUBÚ
- C2 - CX. DE REPART. S. BAIXA
- R4 - AÇUDE ARRUDEIRO (A AMP)
- T1 - TUNEL SERROTE
- T2 - TUNEL SERRA CAIÇARA
- R5 - RESERV. RCH. JARDIM
- U1 - USINA REV. CHAP. ARARIPE
- R6 - RESERV. RCH. BAIÃO
- R7 - RESERV. CHAP. ARARIPE
- R8 - RESERV. RIO CARIÚS
- R9 - AÇUDE P. DA PEDRA
- R10 - RESERV. SUPERIOR U1
- R11 - RESERV. RIO JAGUAR. SUP
- R12 - AÇUDE SACO
- U2 - USINA REV. SERRA TALHADA
- R13 - RESERV. SERRA TALHADA
- R14 - AÇUDE SUMÉ