

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA - FEE  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS - DENSIS

DIMENSIONAMENTO DE USINAS HIDROELÉTRICAS  
CONSIDERANDO OBJETIVOS MÚLTIPLOS  
NA UTILIZAÇÃO DA ÁGUA

Este exemplar corresponde à redação final da tese  
defendida por Roberto Castro  
e aprovada pela Comissão  
Julgadora em 25/3/94  
Orientador

ROBERTO CASTRO

Orientador:

Prof. Dr. Christiano Lyra Filho (FEE)

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia  
Elétrica da Universidade Estadual de  
Campinas - UNICAMP, como parte dos  
requisitos exigidos para a obtenção do  
título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

- MARÇO DE 1994 -



Este trabalho contou com o apoio da Companhia Energética de São Paulo - CESP

## AGRADECIMENTOS

Sobretudo, agradeço a DEUS por ter concretizado este sonho, mas recebi colaborações valiosas, de pessoas que tornaram este trabalho viável. Desse modo quero agradecer ...

- Ao Dorel e Mazzon, pelo imprescindível apoio;
- Ao Christiano, pelo apoio, incentivo, paciência e dedicação;
- Aos profs. Paulo Valente e Mário Veiga, pelas importantes contribuições;
- Aos colegas da CESP, que colaboraram sob as mais variadas formas, em particular ao Avedis, pelas valiosas discussões técnicas;
- Aos amigos do COSE e da MANADA, em particular ao César;
- À minha mãe, irmã e irmão (Lourdes, Nadir e Gilberto), pelo grande incentivo e apoio irrestrito em todos os momentos, especialmente nos mais difíceis;
- Ao meu pai, pelos fartos exemplos de perseverança e dedicação;
- A toda pessoa que tenha se aproximado com um gesto, uma palavra, ou mesmo um pensamento de apoio.

A todos, meu muito obrigado.

MANADA é o conjunto dos "manos" Luís Roberto, Mário, César e eu, quase todos integrantes do COSE em 1988.

"O que eu sou nunca escondi,  
Vantagem nunca contei,  
Muita luta já perdi,  
Muita esperança gastei,  
Até medo já senti,  
E não foi pouquinho não,  
Mas fugir, nunca fugi,  
Nunca abandonei meu chão."

Geraldo Vandré

À minha mãe, à memória de meu pai  
e ao Dimas, meu filho ...

## RESUMO

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia de avaliação de aproveitamentos hidroelétricos com objetivos múltiplos, voltada ao dimensionamento dos parâmetros energéticos da usina.

Uma estratégia de operação eficiente para o reservatório é definida a partir de um problema multicritério, resolvido sucessivamente no horizonte de análise, pelo método  $\epsilon$ -restrito.

Um estudo de caso analisa o dimensionamento da potência instalada num aproveitamento múltiplo fictício, com dados característicos baseados na usina hidroelétrica Formoso.

Obtém-se a potência a ser instalada no aproveitamento sob várias hipóteses de atendimento aos usos não energéticos da água determinando-se as perdas do setor elétrico em cada alternativa. Adota-se o enfoque determinístico nas avaliações, empregando-se uma análise de custo/benefício incremental. A metodologia permite também a adoção do enfoque probabilístico para avaliação do projeto.

## FORWARD RESUME

In addition to the effort already gone into this subject a new methodology for evaluation of multipurpose hydroelectric plants is presented in this work. This methodology has been developed to deal with the subject of determination of such project-related energetic parameters.

Simultaneously, a proposal for efficient reservoir operation is obtained with basis on the formulation and resolution of a thorough multicriteria problem which within the horizon stipulated is successively solved by the  $\epsilon$ -constraint method.

The study of a hypothetycal case whose data input were based on the Formoso hydroelectric scheme accounts the proportion of installed capacity in the pertaining power station for some multipurpose water-related configurations considered. In each one the corresponding electrical power losses have been determined by a deterministic analisys based on the incremental cost/benefit. Futhermore, the methodology of the project avaliation presented permits the application of the probabilistic approach too.

## ÍNDICE

<b>Capítulo I - Dimensionamento de usinas hidroelétricas</b>	01
1.1 - Introdução	01
1.2 - Critérios para dimensionamento de usinas hidroelétricas	05
1.2.1 - Critério determinístico	07
1.2.2 - Critério probabilístico	10
1.3 - Estado da arte do critério para dimensionamento de usinas hidroelétricas no setor elétrico brasileiro	11
1.4 - O problema de dimensionamento com usos múltiplos	13
1.4.1 - Dimensionamento e implantação de usinas com usos múltiplos da água - comentários	14
1.5 - Breve revisão bibliografia sobre o dimensionamento de usinas hidroelétricas	18
1.6 - Uma metodologia para dimensionamento de usinas com usos múltiplos da água	20
 <b>Capítulo II - Formalização e alternativas de solução do problema de dimensionamento de usinas com usos múltiplos</b>	 22
2.1 - Modelo matemático e formulação do problema para definição de uma política de operação de reservatórios com usos múltiplos	23
2.1.1 - Caracterização dos objetivos	23
2.1.2 - Restrições do problema	28
2.1.3 - Formulação do problema multicritério	29



2.2 - Soluções eficientes e curvas de	
trade-off de problemas multiobjetivos	31
2.3 - A repartição dos custos e	
a solução do problema multiobjetivo	33
2.4 - Alternativas de solução do problema	
multiobjetivo (PMO) na definição de	
estratégias operativas de reservatórios	
com usos múltiplos	34
<b>Capítulo III - Programação multiobjetivo na operação</b>	
<b>de reservatórios com usos múltiplos</b>	36
3.1 - Método $\epsilon$ -restrito para solução	
de problemas multiobjetivos	36
3.2 - Método $\epsilon$ -restrito aplicado à definição de estratégias	
operativas de reservatórios com usos múltiplos	37
3.3 - Avaliações sucessivas em um problema	
multiobjetivo dinâmico	40
3.4 - Obtenção de um compromisso eficiente para operação	
do reservatório	43
<b>Capítulo IV - Estudo de caso</b>	47
4.1 - Informações sobre o	
aproveitamento múltiplo analisado	47
4.2 - Resultados obtidos	50
4.3 - Dimensionamento da potência instalada na usina	57
4.3.1 - Benefícios energéticos	57
4.3.2 - Custos de motorização	59
4.3.3 - Análise da relação custo/benefício incremental	60
4.4 - Comentários	65

**Apêndice 1 - Modo de operação e**

**representação do reservatório**

68

**Apêndice 2 - Dados característicos do aproveitamento**

73

**Apêndice 3 - Principais resultados obtidos**

77

**Referências Bibliográficas**

81

# CAPÍTULO I

## DIMENSIONAMENTO DE USINAS HIDROELÉTRICAS

### 1.1 - INTRODUÇÃO

A expansão do parque gerador de energia elétrica brasileiro é feita com base na alocação de obras de geração - usinas hidroelétricas, termoeletricas, reversíveis, ou fontes não convencionais. A prioridade de datas de entrada em operação é estabelecida a partir da competitividade econômica dos empreendimentos, refletida pelos seus custos de geração<sup>1</sup>.

Adota-se o critério de expandir o sistema ao mínimo custo marginal de expansão, segundo a "Teoria Marginalista", pela qual os empreendimentos com menor custo de geração têm preferência no cronograma. O conjunto de obras do programa de expansão é ordenado de forma crescente dos custos de geração dos projetos.

Para que uma determinada usina seja candidata a integrar o plano de expansão, é necessário que tenha sido avaliada sob seus aspectos técnicos, econômicos e sócio-ambientais, de modo a obter-se com a sua implantação o maior benefício possível, aliado ao menor investimento. Ou seja, é necessário que se faça o *dimensionamento* do aproveitamento, determinando-se seus parâmetros de projeto e custo de geração, condicionados aos recursos energéticos e características físicas do local de implantação.

---

<sup>1</sup> O custo de geração (ou custo de operação) de uma usina hidroelétrica é calculado com base nos custos operacionais e de implantação e nos benefícios energéticos. É uma grandeza expressa em (US\$/MWh) que traduz o índice de mérito da usina.

Para o correto dimensionamento de uma usina hidroelétrica é necessário que se disponha de uma metodologia de avaliação composta por estratégias de operação individualizada do aproveitamento e modelos computacionais, que permitam identificar variações no desempenho da usina, em função de mudanças nos seus parâmetros.

Os benefícios energéticos devem ser avaliados tomando-se por base uma configuração de referência, representativa da época em que a usina em estudo será agregada ao sistema (Fortunato et al., 1990). Nos casos em que a interferência da usina no restante do sistema seja muito sensível, deve-se considerar diferentes cenários prováveis para configuração de referência, avaliando-se o aproveitamento frente a cada cenário.

Além de se conhecer o contexto da expansão em que a usina será incluída, para se determinar os parâmetros do projeto, pressupõe-se o conhecimento detalhado da forma com que a mesma irá operar. De certa forma, o dimensionamento de uma usina pode ser entendido como o elo de ligação entre o planejamento da expansão e o planejamento da operação do sistema.

Uma vez definida a *divisão de quedas* de uma bacia hidrográfica, os estudos para dimensionamento energético das usinas que a compõem, concentram-se na definição dos principais parâmetros do projeto, que definem sua concepção: nível d'água máximo normal (NAMax), máxima depleção operativa e volume útil do reservatório, potência instalada, queda de projeto e queda de referência das turbinas. Se os recursos hídricos disponíveis no local do aproveitamento forem destinados exclusivamente à geração de energia, esses parâmetros são determinados através da aplicação das metodologias de dimensionamento adotadas atualmente pelo setor elétrico, empregando modelos computacionais de otimização ou de simulação individualizada. Em situações onde os usos múltiplos dos reservatórios não são explicitamente considerados, esses modelos permitem obter a "resposta" do sistema.

A valorização econômica dos benefícios energéticos obtidos com o aproveitamento, comparada com os custos incorridos, permitem utilizar a análise de custo/benefício incremental nos estudos de dimensionamento das usinas. Assim, quando se trata de aproveitamentos com objetivos puramente energéticos, pode-se dizer que a questão do dimensionamento está bem equacionada, pois o setor elétrico dispõe de metodologias de avaliação e critérios adequados.

Entretanto, a demanda da sociedade civil brasileira, e seu maior poder de organização em algumas regiões do País, têm feito com que os técnicos do setor elétrico atentem para outros fatores, além da geração de energia. Dentre esses fatores, encontram-se a preservação do meio ambiente e da qualidade da água, cuidados com a fauna e flora, opções de recreação e lazer, controle de cheias, intensificação da agricultura pelo incremento de áreas irrigadas, navegação e pesca.

A vida útil econômica<sup>2</sup> adotada pelo setor elétrico brasileiro para usinas hidroelétricas é de 50 anos. Se a usina não tiver sido dimensionada levando em consideração os usos múltiplos da água do seu reservatório e, no transcorrer de sua vida útil, o reservatório passar a ser utilizado com outras finalidades, conflitantes com a geração energética, o montante de energia previsto para ser retirado da usina se reduz. Nessas condições, o setor elétrico terá investido em equipamentos para produção energética, e em obras civis no local, que passarão a ficar ociosos por um tempo maior do que o previsto na fase de dimensionamento da usina, podendo, inclusive, tornar o aproveitamento anti-econômico.

Os investimentos para construção de uma usina hidroelétrica são normalmente muito altos. Assim, a perda da atratividade econômica desses empreen-

---

<sup>2</sup> Tempo de vida útil considerada nas análises econômicas, embora a usina possa efetivamente operar por mais tempo

dimentos representam grandes prejuízos para as empresas do setor elétrico; prejuízos que, em última instância, recairão sobre a própria sociedade.

Dessa maneira, torna-se necessário dimensionar as usinas não apenas com base na minimização da relação custo/benefício para o setor elétrico, mas contemplando o aproveitamento múltiplo dos recursos hídricos. Ou seja, deve-se considerar explicitamente as diversas demandas para operação do reservatório e utilização da água.

Embora sejam conhecidas metodologias e critérios para o dimensionamento de usinas hidroelétricas voltadas exclusivamente à geração de energia, não existe uma técnica consolidada para focar os usos e objetivos múltiplos dos reservatórios nesses estudos (Eletrobrás, 1991). Esta é a motivação básica deste trabalho, que trata o problema de dimensionamento de usinas hidroelétricas cujos reservatórios estejam sujeitos a usos múltiplos da água.

No próximo item, são descritos sucintamente os critérios utilizados pelo setor elétrico brasileiro nos estudos de dimensionamento de usinas, relacionando-os com a evolução dos critérios de suprimento de energia entre empresas. No item 1.3 analisa-se o problema de dimensionamento de usinas hidroelétricas, destacando-se o estado da arte do dimensionamento de usinas hidroelétricas no Brasil e salientando os esforços dos técnicos do setor para consolidar um critério unificado. Em seguida, no item 1.4, discute-se o dimensionamento com usos múltiplos da água, analisando as dificuldades na avaliação e implantação desses aproveitamentos. Em 1.5 procede-se a uma revisão bibliográfica do problema de dimensionamento com usos múltiplos e no item 1.6 apresenta-se a idéia geral de uma metodologia baseada em programação multicritério para definir políticas de operação de reservatórios com usos múltiplos. Essa metodologia adotada como base para o dimensionamento de usinas com usos múltiplos da água.

## 1.2 - CRITÉRIOS PARA DIMENSIONAMENTO DE USINAS HIDROELÉTRICAS

O critério básico para dimensionamento de uma usina hidroelétrica consiste em determinar os parâmetros do projeto que maximizem a diferença entre os benefícios agregados pelo aproveitamento e os custos incorridos. Ou seja, deve-se maximizar a função  $\psi$ ,

$$\psi = BT - CT \quad (1)$$

onde BT representa os benefícios e CT representa os custos com a implantação da obra, diretamente relacionados com os parâmetros do projeto. A função  $\psi$  deve ser determinada através de uma metodologia consistente, sob pena de se distorcer a análise e levar à definição errônea da concepção da obra.

O dimensionamento de usinas é influenciado pelo critério de suprimento de energia entre empresas e pela estrutura de tarifação desse suprimento. Assim, os critérios para dimensionamento de usinas adotados pelo setor elétrico brasileiro modificaram-se ao longo do tempo, à medida que evoluíram os critério de suprimento de energia entre empresas e a sistemática de tarifação.

A estrutura tarifária valorizava principalmente o suprimento de potência<sup>3</sup> e passou a remunerar basicamente o suprimento de energia<sup>4</sup>, com grande influência nos estudos de dimensionamento das usinas. Transferindo-se a remuneração básica da ponta para a energia, as empresas do setor, de maneira geral, passaram a evitar o "investimento em ponta", motorizando suas usinas para

---

<sup>3</sup> Suprimento de potência (ou de ponta) entendido como o suprimento de carga na hora da demanda máxima do sistema.

<sup>4</sup> Suprimento de energia entendido como o atendimento à base da curva de carga do sistema

operar com fatores de capacidade mais elevados. Em muitos casos, função dessa mudança, passou-se a recomendar a instalação da potência de base<sup>5</sup> das usinas, ou seja, nenhuma motorização para o atendimento exclusivo da demanda de ponta do sistema (Chaves, 1992).

Para se determinar o intercâmbio de energia e potência entre as várias empresas do sistema brasileiro, são empregados os critérios de suprimento definidos no âmbito do GCPS<sup>6</sup> e GCOI<sup>7</sup>, onde, através das interligações elétricas regionais, usinas que operam numa região podem suprir o mercado de outra região, fornecendo energia segundo as regras estabelecidas.

A metodologia de suprimento entre empresas era tradicionalmente baseada na garantia de suprimento sem déficits, na hipótese de repetição do histórico de vazões afluentes. Atualmente adota-se o critério probabilístico que estabelece, como garantia de suprimento, um nível de risco de déficit pré-fixado, quando a energia afluyente ao sistema é representado por uma amostra estatística de séries sintéticas, geradas a partir do histórico de vazões.

Da evolução no critério de suprimento surgiram dois critérios básicos para o dimensionamento de usinas - Critério determinístico e critério probabilístico, cujas características principais são discutidas nos itens a seguir.

---

<sup>5</sup> Potência de base é a menor potência instalada que permite o aproveitamento de toda a energia da usina.

<sup>6</sup> GCPS : Grupo Coordenador do Planejamento do Sistema

<sup>7</sup> GCOI : Grupo Coordenador da Operação Interligada



### 1.2.1 - Critério Determinístico

No critério determinístico adota-se a hipótese de que o parque gerador deve ser dimensionado para atender sem déficit um determinado mercado de energia elétrica, caso o histórico de vazões venha a se repetir, simultaneamente para todos os aproveitamentos da configuração de referência. Os modelos computacionais empregados nas avaliações são principalmente de simulação a usinas individualizadas.

Determina-se o maior mercado que pode ser atendido sem déficit, chamado de **carga crítica**. Associado à carga crítica, determina-se o **período crítico**, correspondente ao maior período do histórico conhecido de vazões em que o sistema, submetido à sua carga crítica, parte da condição de totalmente cheio (volume a 100% do armazenamento útil total) e chega à condição de totalmente vazio (volume a 0% do volume útil total).

As gerações individuais dos aproveitamentos são determinadas considerando-se uma curva de carga com dois patamares (energia e ponta), de modo que implicitamente pressupõe-se uma flexibilidade operativa das usinas e do sistema de transmissão, suficiente para atender toda a variação da carga dentro do intervalo de discretização (Siqueira, 1992). De outra maneira, não se poderia supor que o mercado estará plenamente atendido quando os patamares de ponta e energia forem atendidos.

Associam-se ainda ao critério determinístico, para dimensionamento de usinas, os seguintes conceitos:

**ENERGIA FIRME** - valor médio da geração de um aproveitamento ou de um conjunto de aproveitamentos, durante o período crítico do sistema; a carga crítica é a energia firme de todo o sistema de referência;

**ENERGIA MÉDIA** - valor médio da geração de um aproveitamento, ou de um conjunto de aproveitamentos, considerando todo o histórico de vazões;

**PONTA GARANTIDA** - potência disponível num aproveitamento, ou num conjunto de aproveitamentos do sistema, com garantia mínima de 95% do tempo, considerado todo o histórico de vazões afluentes;

**ENERGIA SECUNDÁRIA** - quando há coincidência entre o período crítico de uma usina e o período crítico do sistema, pode-se definir a energia secundária desta usina como a diferença entre sua energia média e firme, admite-se que a energia secundária seja utilizada para substituir geração térmica em condições hidrológicas mais favoráveis que o período crítico do sistema.

A capacidade máxima (volume máximo) do reservatório é determinada através de uma análise de custo/benefício incremental, onde o ganho de energia é considerado como benefício associado ao aumento na cota máxima do reservatório, cujo custo deve ser conhecido (incluindo-se a construção da barragem e as desapropriações). Determina-se dessa maneira o nível d'água máximo do reservatório (NAm<sub>ax</sub>).

O cálculo do deplecionamento máximo na usina é feito exclusivamente com base no ganho de energia firme proporcionado pelos vários níveis de deplecionamento analisados. Procede-se à simulação do sistema de referência, adotando-se para a usina em foco, o valor de NAm<sub>ax</sub> previamente calculado e consideram-se diversos valores de nível d'água mínimo (NA<sub>min</sub>) para o aproveitamento. Cada par de valores NAm<sub>ax</sub> e NA<sub>min</sub>, determinam um deplecionamento máximo operativo para o reservatório.

A variação no deplecionamento de uma usina pode ocasionar variações energéticas em outros aproveitamentos. Adota-se como NA<sub>min</sub> da usina, o valor que fornece o maior ganho de energia firme, não apenas no aproveitamento, mas em todo o sistema simulado.

O nível de motorização adotado para o aproveitamento nesses cálculos, deve ser grande o suficiente para não interferir nos ganhos energéticos obtidos nos cálculos do  $N_{\text{max}}$  e  $N_{\text{min}}$ .

Determinado o deplecionamento máximo operativo do aproveitamento, calcula-se a potência a ser instalada na usina através de uma análise custo/benefício incremental, onde são computados os ganhos de energia firme, média, secundária e de ponta garantida, em função do acréscimo de potência instalada.

A valorização econômica dos ganhos energéticos pelos custos de referência de expansão determina o benefício obtido com a motorização da usina. Os custos associados são definidos pelos totais de investimentos necessários para o mesmo nível de motorização, acrescidos dos juros durante a construção (jdc) - resultantes da necessidade de captação de recursos financeiros externos ao setor elétrico.

A metodologia de análise mais freqüentemente empregada pelas empresas do setor elétrico consiste na utilização de modelos de simulação a usinas individualizadas (Eletrobrás, 1979) para auferir os parâmetros da usina em estudo. Entretanto, outros modelos computacionais podem ser utilizados nesta avaliação, como, por exemplo, o modelo MAKOREH (Castor, 1991), que simula usos múltiplos da água dos reservatórios através do atendimento de demandas desses usos, sem empregar uma técnica formal de programação multiobjetivo.

As metodologias empregadas na avaliação dos projetos distinguem-se pelos modelos computacionais empregados nas análises. Porém, o critério determinístico para dimensionamento de usinas implica na avaliação dos parâmetros energéticos discutidos neste item.

### 1.2.2 - Critério Probabilístico

O critério probabilístico para dimensionamento de usinas hidroelétricas baseia-se na hipótese de que o mercado de energia deve ser atendido com uma probabilidade de déficit conhecida, chamada de **risco de déficit**. O setor elétrico brasileiro adota um risco de déficit de 5%.

As metodologias de avaliação dos projetos envolvem modelos de otimização a subsistemas equivalentes e modelos de simulação a usinas individualizadas. Os principais parâmetros a serem determinados para aplicação do critério probabilístico no dimensionamento de usinas hidroelétricas são definidos a seguir.

**CARGA CRÍTICA:** máximo valor de energia que um sistema de referência pode atender com risco de déficit pré-fixado (5%);

**ENERGIA GARANTIDA:** valor esperado de geração numa usina do sistema sujeito ao atendimento de sua carga crítica;

**DÉFICIT ESPERADO:** valor esperado de energia não suprida pelo sistema de referência;

**CUSTO MARGINAL DE OPERAÇÃO:** custo incorrido no sistema para atender a um acréscimo marginal de mercado;

**VALOR MARGINAL DA ÁGUA:** custo incorrido no sistema pelo deplecionamento de uma quantidade marginal de água dos reservatórios.

A probabilidade de déficit para uma configuração de referência é calculada levando em conta a aleatoriedade das vazões afluentes. Gera-se, a partir do histórico conhecido, um número significativo de séries sintéticas de vazões ou energias afluentes.

Enquanto a série histórica de vazões médias mensais é composta atualmente por cerca de 65 anos, o conjunto de séries sintéticas estatisticamente equivalente, geradas a partir desse histórico, pode ser composto de milhares de séries de afluições com características (energéticas) mais ou menos favoráveis em relação às vazões conhecidas.

O cálculo do suprimento de energia entre empresas é feito atualmente, com base em critérios probabilísticos e energia garantida dos aproveitamentos, não se dispondo de um critério probabilístico consolidado para dimensionamento de usinas hidroelétricas.

No item a seguir, descreve-se o esforço das empresas do setor elétrico para consolidar este critério e torná-lo compatível com o suprimento de energia. Procura-se ainda identificar o estado da arte do critério para dimensionamento de usinas no setor elétrico brasileiro.

### **1.3 - ESTADO DA ARTE DO CRITÉRIO PARA DIMENSIONAMENTO DE USINAS HIDROELÉTRICAS NO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO**

No atual modelo institucional do setor elétrico brasileiro, cada empresa é responsável pelo dimensionamento das usinas cujas concessões lhes pertencem. Cabe à ELETROBRÁS a supervisão e avaliação dos trabalhos realizados.

Embora os estudos sejam descentralizados, os critérios adotados devem ser uniformes, de modo a permitir uma comparação adequada dos projetos, viabilizando a definição de prioridades no financiamento das obras. A consolidação de um critério de dimensionamento de usinas com base em avaliações probabilísticas está condicionada à conclusão dos trabalhos de uma equipe montada no âmbito do GCPS e que conta com a participação de todas as empresas do setor elétrico (Eletrobrás, 1991).

Além da equipe de dimensionamento de usinas, foi criado o Grupo de Trabalho para Análise de Projetos, visando obter critérios de avaliação econômica de projetos contemplando os usos múltiplos da água e a inserção regional<sup>8</sup> dos empreendimentos.

Embora os enfoques básicos desses grupos sejam distintos entre si, observa-se, na prática, várias zonas de intersecção nos trabalhos desenvolvidos pelos mesmos. As principais delas são:

- i) O objetivo de ambos os grupos é a uniformização de critérios de análises de projetos;
- ii) Tentativa de consolidar um critério probabilístico para dimensionamento de usinas hidroelétricas;
- iii) Os usos múltiplos da água e a inserção regional foram incluídas nas análises econômicas dos aproveitamentos.

Pela criação e atuação desses grupos, observa-se a preocupação de uniformizar os critérios de avaliação de usinas hidroelétricas, com tendência a se considerar os critérios probabilísticos nessas avaliações. Quanto à consolidação de um critério de dimensionamento de usinas propriamente dito, verifica-se atualmente uma fase de transição.

Os critérios determinísticos não atendem à necessidade de compatibilização entre suprimento de energia e o dimensionamento de usinas. Neste contexto, seguindo propostas apresentadas à equipe de dimensionamento de usinas hidroelétricas (Copel, 1990; Eletrosul, 1990; Braz, 1988), algumas empresas abandonaram a análise determinística no dimensionamento de suas usinas, mesmo sem

---

<sup>8</sup> A inserção regional de um projeto é definida como o impacto causado por uma obra na região em que será implantada, podendo se tratar de impactos positivos ou negativos

disporem de um critério probabilístico consolidado. Os trabalhos de dimensionamento de usinas resultantes da aplicação dessas novas metodologias (Braz et al, 1993) têm servido de base para análises internas às empresas, não sendo considerados na comparação dos projetos, elaborada pela ELETROBRÁS.

Além disso, a ausência de uma metodologia para análise explícita de usos múltiplos da água nos reservatórios faz com que projetos de usos múltiplos sejam avaliados sem a utilização de técnicas de programação multiobjetivo, adequadas para essas avaliações (Engecorps, 1992).

Observa-se, portanto, duas lacunas nos critérios determinísticos para dimensionamento de usinas atualmente em vigor. A primeira diz respeito à incompatibilidade deste critério com o critério de suprimento de energia entre empresas. A outra refere-se à necessidade de avaliação de usos múltiplos dos reservatórios.

#### 1.4 - O PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO COM USOS MÚLTIPLOS

Para caracterizar, de maneira mais precisa, o problema de dimensionamento de usinas com usos múltiplos da água, faz-se necessária a diferenciação entre problemas com usos múltiplos e problemas com objetivos múltiplos. A consideração de usos múltiplos não resulta, necessariamente, em problemas que envolvam múltiplos objetivos.

Um reservatório construído para maximizar o retorno financeiro do investimento na sua construção e operação, mas que, além de atender aos requisitos de geração de energia elétrica, seja utilizado para lazer e regularização da navegação, por exemplo, é um reservatório com usos múltiplos, mas com

objetivo único. Observe-se que, neste caso, não é relevante a paralisação do fluxo de embarcações e do lazer, em alguns períodos, desde que seja essa a operação que maximiza o retorno financeiro do reservatório ao longo do tempo.

Por outro lado, um reservatório pode ser construído para atender a vários usos, com objetivos distintos, tais como maximizar a energia gerada, maximizar a área irrigada, maximizar a quantidade de pessoas usuárias do reservatório para fins de lazer e minimizar o tempo de interrupção da navegabilidade. Neste caso, os objetivos dos vários usuários do reservatório são distintos e normalmente conflitantes entre si, o que caracteriza um problema com objetivos múltiplos. O comprometimento de cada usuário é maior neste caso, possibilitando a repartição dos custos de construção e operação do empreendimento, de maneira mais clara, entre eles.

Em geral, não existe uma solução que otimize simultaneamente os múltiplos objetivos de um reservatório. A solução dos conflitos resultantes, passa necessariamente pela adoção de alternativas de compromisso entre os grupos usuários. A caracterização adequada dessas alternativas implica na solução de problemas de tomada de decisões com objetivos múltiplos.

#### **1.4.1 - Dimensionamento e Implantação de Usinas com**

##### **Usos Múltiplos da Água - Comentários**

Um aspecto fundamental para o dimensionamento e implantação de reservatórios com usos múltiplos da água é a identificação das características do local e da região em que será implantado o aproveitamento. Ou seja, deve-se identificar muito bem a "vocação natural do curso d'água", nos horizontes de



curto, médio e longo prazos. Alguns exemplos da necessidade dessa caracterização encontrados no caso brasileiro são comentadas a seguir:

Um reservatório a ser implantado na bacia do Rio São Francisco (Nordeste), por exemplo, deverá prever a utilização da água represada, tanto para a geração de energia como para irrigação, navegação e abastecimento, urbano e industrial.

O aproveitamento do potencial energético da região Norte está condicionado à preservação do meio ambiente e das condições de vida das populações indígenas (preocupação também em outras regiões brasileiras). Além disso, como grande parte da energia deverá ser exportada para outras regiões, não promovendo um maior desenvolvimento do próprio Norte, a exploração desse potencial poderá ser inaceitável. Ressalte-se que a preservação do meio ambiente é uma restrição a ser atendida tanto na implantação do reservatório, limitando sua área inundada (e conseqüentemente seu volume), quanto na operação da usina, estabelecendo limites máximos e mínimos na defluência do reservatório (qualidade da água a jusante), ou mesmo limitando sua velocidade de deplecionamento, de modo a permitir a melhor adaptação dos peixes.

Nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, o abastecimento urbano, o controle de cheias, a irrigação, o lazer e a navegação deverão ser previstos nos aproveitamentos (especialmente naqueles construídos próximos às regiões mais densamente povoadas).

Observa-se uma tendência crescente em se destacar os demais usos dos reservatórios frente à utilização energética dos aproveitamentos, especialmen-

te no que diz respeito à preservação do meio ambiente, onde os organismos internacionais de financiamento, têm centralizado suas exigências tornando fundamental a avaliação dos impactos ambientais na viabilidade dos projetos.

A análise de custo/benefício incremental não pode ser utilizada diretamente em problemas de reservatórios com usos múltiplos da água. A principal dificuldade encontrada para aplicação dessa metodologia de análise econômica é que nem sempre os objetivos podem ser quantificados na mesma unidade (Loucks et al, 1981). A análise desses problemas deve ser feita por metodologias mais completas, envolvendo também os aspectos não econômicos.

A incompatibilidade entre as unidades utilizadas na quantificação dos vários objetivos é apontada como uma das dificuldades para implantação de projetos com usos múltiplos, aliada aos aspectos legais e institucionais, particularmente difíceis no caso brasileiro. Sobre este tema vale lembrar as palavras da "National Water Commission" norteamericana (Kelman, 1989):

"É tolice tentar converter todos os efeitos sociais, ambientais e econômicos em uma unidade comum. Valores monetários, apesar de apropriados para medir efeitos econômicos, podem não fazer sentido na medida de efeitos não econômicos. Uma segurança contra a falsa precisão é quantificar o quantificável e separar o não quantificável, deixando sua avaliação nos simples e textuais termos nos quais, em última instância, o decisor deve se basear."

Kelman (1989) sugere como alternativa de solução dos conflitos gerados pela utilização múltipla da água, a associação entre os usuários quando da implantação e operação dos aproveitamentos de usos múltiplos.

O envolvimento de todos os usuários, entretanto, deve ser entendida

como uma condição necessária, porém não suficiente. Necessária porque as soluções de compromisso adotadas deverão ser avaliadas por todos os usuários. Não suficiente, porque dessa avaliação poderão surgir impasses intransponíveis, levando à impossibilidade de soluções conjuntas.

A implantação de aproveitamentos com usos múltiplos da água encontra ainda dificuldades a nível institucional. No Brasil, a multiplicidade de órgãos envolvidos nos aproveitamentos dos recursos hídricos representa sérios problemas à integração dos diversos usos da água (ABRH, 1989). Embora a legislação sobre águas esteja centralizada na União, por força de dispositivo constitucional, encontra-se compartimentada nos diversos órgãos federais, dificultando a administração conjunta do aproveitamento múltiplo da água. Além disso, a legislação brasileira não é clara em relação à metodologia de repartição de custos entre os usuários dos recursos hídricos, gerando empecilhos à implantação de aproveitamentos múltiplos.

Quanto ao aspecto técnico, o dimensionamento e implantação de reservatórios com múltiplos usos esbarra na inexistência de uma metodologia consolidada para avaliação dos projetos, embora as empresas do setor elétrico estejam reunindo esforços para esse fim.

O tema mostra-se complexo, tanto do ponto de vista institucional, quanto legal e técnico. Entretanto, a dinâmica da sociedade e sua crescente participação nas decisões, deverá levar à superação das dificuldades, permitindo um aproveitamento mais eficiente dos recursos hídricos.

## 1.5 - BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O DIMENSIONAMENTO DE USINAS HIDROELÉTRICAS

Neste item serão discutidos sucintamente alguns trabalhos sobre o dimensionamento de usinas hidroelétricas e o planejamento da expansão/operação de sistemas com reservatórios de usos múltiplos. A aplicação de otimização multicritério é pouco tratada nesta área. Dos trabalhos existentes, a maior parte refere-se à operação dos reservatórios.

Sharad (1987) sugere a utilização do *diagrama de massa* para dimensionamento do volume dos reservatórios. O método consiste em utilizar-se o histórico de vazões afluentes, considerando uma demanda constante para vazão defluente no aproveitamento. A inicialização do processo de cálculo é feita com o reservatório em qualquer condição de armazenamento, sendo a demanda atendida em cada período de discretização. Quando a vazão afluente é maior que a demanda, a diferença é armazenada no reservatório. Caso contrário, ele é deplecionado.

Obtém-se uma trajetória de operação do reservatório chamada *diagrama de massa*. Esta informação permite calcular o volume necessário do reservatório para atender à demanda, na hipótese de repetição do histórico de vazões. O procedimento é bastante simples e sua aplicação é bastante usual, mas considera a operação do reservatório restrita ao atendimento de uma demanda fixa, de modo que sua utilização não pode ser generalizada.

As propostas de aprimoramento da metodologia são no sentido de incluir as perdas por evaporação, aplicando um índice de evaporação à área média do reservatório entre dois períodos consecutivos (Sharad, 1987) ou sobre a área no próprio período de discretização. A inclusão dos usos múltiplos da água nas análises é feita pela alteração da demanda hídrica do reservatório, somando-se

a ela, as vazões necessárias para atender aos usos múltiplos.

Larry e Tung (1992) apresentam uma formulação matemática para o dimensionamento e determinação da política ótima de operação de um sistema de reservatórios com usos múltiplos da água, considerando a geração de energia, abastecimento urbano e industrial, irrigação, lazer e vazão mínima defluente. O controle de cheias não é considerado. A abordagem é simplista, à medida em que considera todos os benefícios dos usos múltiplos em bases monetárias - na prática, nem sempre é possível traduzir economicamente esses benefícios. A função objetivo do problema considera a maximização da diferença entre benefícios e custos.

O problema a ser resolvido é não linear com função objetivo única. Para solução desse problema, os autores recomendam a utilização de algoritmos de programação não linear, de programação linear, após a linearização adequada do problema original, ou a programação dinâmica.

Em Fortunato et al. (1990) e GCPS (1982) descreve-se detalhadamente a metodologia para dimensionamento de usinas hidroelétricas vigente no setor elétrico brasileiro. Como destacado no item 1.3, esta metodologia utiliza o enfoque determinístico e aplica-se a usinas sem usos múltiplos da água.

Em Ricciulli (1990) é apresentada uma metodologia baseada em programação multiobjetivo para o planejamento da expansão de sistemas hidrotérmicos, visando minimizar os custos da expansão e maximizar os benefícios com os usos múltiplos da água. O autor sugere um método iterativo seqüencial, com uso de programação por metas para obter uma solução do problema, chamada solução principal. É gerado também um conjunto de soluções alternativas, obtidas pela exploração do conjunto de soluções eficientes do problema.

Andrade (1986), analisa a operação da bacia do Rio São Francisco,

tendo em vista a geração de energia e irrigação. A metodologia apresentada utiliza programação dinâmica estocástica e reduz o problema multiobjetivo a um problema de objetivo único, através da aplicação do método dos pesos.

Yeh e Becker (1982) apresentam uma metodologia baseada em programação multiobjetivo para análise da operação, em tempo real<sup>9</sup>, de um sistema de reservatórios com usos múltiplos da água. Os autores propõem a utilização do método  $\epsilon$ -restrito para determinar os pontos de trade-off entre as várias funções objetivo consideradas nas análises. O problema de operação dos reservatórios é resolvido por programação linear e programação dinâmica.

#### 1.6 - UMA METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE USINAS COM USOS MÚLTIPLOS DA ÁGUA

Este trabalho propõe uma metodologia para dimensionamento de usinas hidroelétricas considerando explicitamente os usos múltiplos dos reservatórios. Os benefícios dos aproveitamentos são avaliados a partir de uma estratégia de operação formalmente eficiente, obtida através de técnicas de otimização multicritério.

A operação de reservatórios com usos múltiplos da água pode ser caracterizada como um problema multicritério, dinâmico e não linear. O capítulo II formaliza este problema e propõe uma abordagem baseada na generalização do princípio de otimalidade da programação dinâmica. A estratégia leva a um processo de solução baseado em avaliações de problemas multiobjetivos lineares, resolvidos a cada transição de estado.

---

<sup>9</sup> Operação em tempo real entendida como o planejamento de operação do reservatório no curtíssimo prazo, em termos horários, por exemplo.

O capítulo III discute a aplicação de técnicas multiobjetivo para solução dos problemas de transição de estado.

No capítulo IV apresenta-se um estudo de caso para dimensionamento com usos múltiplos, empregando a metodologia apresentada nos capítulos II e III.

O capítulo V resume as idéias discutidas no trabalho e enfatiza a necessidade de critérios consolidados para o dimensionamento com usos múltiplos, e repartição dos custos envolvidos. Discute-se também, nesse capítulo, os possíveis desdobramentos do trabalho e as limitações da metodologia apresentada.

## CAPÍTULO II

### FORMALIZAÇÃO E ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE DIMENSIONAMENTO DE USINAS COM USOS MÚLTIPLOS

Os estudos para dimensionamento de uma usina consistem na avaliação do projeto, visando a determinação de seus parâmetros, de modo a otimizar a utilização dos recursos. Em aproveitamentos puramente energéticos, todos os recursos hídricos estão disponíveis para geração de energia, enquanto que, em aproveitamentos com objetivos múltiplos, esses recursos devem ser compartilhados entre todos os usuários do reservatório.

Uma metodologia aplicável ao dimensionamento de usinas com usos múltiplos da água deve fornecer ao analista uma *divisão eficiente* dos recursos hídricos disponíveis, associada a uma política de operação do aproveitamento. Para o setor elétrico, em particular, a estratégia de operação deve permitir a avaliação energética do projeto ao longo de um certo horizonte de estudo.

No capítulo anterior destacou-se a necessidade de avaliar os usos múltiplos da água no dimensionamento de usinas. Neste capítulo discute-se o problema de operação de reservatórios com usos múltiplos, visando ao dimensionamento da usina.

O próximo item apresenta um modelo matemático e uma proposta de formulação do problema. No item 2.2 discute-se resumidamente os principais conceitos associados à otimização multicritério. Em 2.3 discute-se a repartição dos custos entre os usuários e no item 2.4 são avaliadas algumas alternativas para solução do problema de operação de reservatórios com usos múltiplos da água.



## 2.1 - MODELO MATEMÁTICO E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA PARA DEFINIÇÃO DE UMA POLÍTICA DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS COM USOS MÚLTIPLOS

Deve-se encontrar um método para solução do problema de operação de usinas com usos múltiplos da água que forneça uma solução onde os usuários do aproveitamento sejam atendidos da melhor maneira possível.

### 2.1.1 - Caracterização dos Objetivos

O problema será formulado a partir da caracterização individual dos objetivos dos principais setores candidatos ao uso da água do reservatório - geração de energia, irrigação, abastecimento, controle de cheias, preservação do meio ambiente, navegação e lazer.

#### A. Geração de Energia Elétrica

O objetivo das empresas do setor elétrico é maximizar a geração de energia elétrica ao longo de todo o horizonte de estudo. A função de geração  $f_g$  pode ser definida pela equação (2).

$$f_g = K \sum_{t=1}^T \eta_t q t_t (h_t - p_t) \quad (2)$$

onde,

$f_g$  = energia gerada pela usina ao longo de todo o período de análise  
(MW);

$K$  = coeficiente de transformação que leva em conta a aceleração da gravidade e o peso específico da água;

$\eta_t$  = rendimento do conjunto turbina gerador no período t, função da queda bruta disponível no aproveitamento;

$q_t$  = vazão turbinada no período t ( $m^3/s$ );

$h_t$  = queda bruta disponível no período t (m);

$p_t$  = perda hidráulica no período t (m).

## B. Vazão de Vertimento

Num aproveitamento com usos múltiplos da água, a vazão vertida pode ser utilizada, por exemplo, para lazer e diluição de poluentes, ou representar as perdas d'água por eclusagem e escada de peixe na usina. A vazão vertida é dissociada da vazão turbinada apenas em aproveitamentos com arranjos particulares, onde a vazão vertida segue um caminho próprio, diferente do utilizado para a saída d'água pela casa de força.

O lazer, a diluição de poluentes, as perdas por eclusagem e escada de peixe são representados por suas respectivas demandas de vazão vertida desejável. A melhor forma de se atender a esses usos da água é minimizar, em cada intervalo do horizonte de análise, os desvios da vazão vertida, em relação à demanda de vertimento no período. Ou seja, minimiza-se as funções  $f_{v_t}$ , definida a seguir.

$$f_{v_t} = (dv_t - qv_t) \quad \forall t, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

onde,

$dv_t$  = demanda de vazão de vertimento no período t ( $m^3/s$ );

$qv_t$  = vazão vertida no período t ( $m^3/s$ ).

### C. Volume de Espera

O controle de cheias a jusante do reservatório requer, a cada período de tempo ( $t$ ), um volume de espera (ou um volume meta) no reservatório.

O volume de espera é um volume vazio, deixado no reservatório para ser preenchido na hipótese de cheias. Trata-se, portanto, de um volume de segurança para o controle de vazões a jusante. O volume meta é o máximo volume que deve permanecer no reservatório no período  $t$ , ou seja, é o complementar do volume de espera em relação ao armazenamento máximo do reservatório.

A minimização das funções  $f_{e_t}$ , que representam os desvios do volume no reservatório em relação ao volume meta para cada intervalo, leva ao melhor atendimento possível do controle de cheias,

$$f_{e_t} = (V_t - de_t) \quad \forall t, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

onde,

$de_t$  = demanda de volume meta no período  $t$  ( $\text{hm}^3$ );

$V_t$  = volume no reservatório no período  $t$  ( $\text{hm}^3$ ).

Na operação normal de um reservatório, o volume meta mensal para efeito de controle de cheias pode eventualmente ser superado, desde que isso não ocorra durante um longo período de tempo, ou com uma frequência indesejável.

### D. Irrigação

Embora uma parte da água utilizada na irrigação agrícola geralmente retorne ao lençol freático da própria bacia hidrográfica de onde foi retirada, parcela significativa dessa água é absorvida pelas plantas ou evapora, ocasionando

nando uma redução na disponibilidade de recursos para os demais usos da água - em particular, para a geração de energia.

O usuário da vazão irrigada estabelece uma demanda, definida em cada período de discretização. Deve-se minimizar os desvios entre as vazões atribuídas à irrigação e as suas demandas em cada período do horizonte de análise. Ou seja, deve-se minimizar as funções  $f_{i_t}$ ,

$$f_{i_t} = (d_{i_t} - q_{i_t}) \quad \forall t, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

onde,

$d_{i_t}$  = demanda de vazão de irrigação no período  $t$  ( $m^3/s$ );

$q_{i_t}$  = vazão de irrigação no período  $t$  ( $m^3/s$ ).

#### E. Abastecimento Urbano ou Industrial

O abastecimento urbano, ou industrial é feito através da retirada de água do reservatório, ou a jusante dele. Nas regiões mais densamente povoadas, os aproveitamentos geralmente devem atender a este uso da água, cujo conflito com a geração de energia elétrica evidencia-se na menor disponibilidade de água para fins energéticos.

Analogamente à vazão de irrigação, o abastecimento urbano, ou industrial, caracteriza uma demanda de vazão mensal. Deve-se minimizar as funções  $f_{a_t}$ , que representam os desvios das vazões retiradas para abastecimento em relação às suas demandas.

$$f_{a_t} = (d_{a_t} - q_{a_t}) \quad \forall t, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (6)$$

onde,

$da_t$  = demanda de vazão de abastecimento no período  $t$  ( $m^3/s$ );

$qa_t$  = vazão de abastecimento no período  $t$  ( $m^3/s$ ).

#### F. Defluência Mínima

A vazão defluente num reservatório é definida pela soma da vazão turbinada com a vazão vertida. Especifica-se uma defluência mínima num aproveitamento, por exemplo, para diluição de poluentes, preservação da fauna e flora, piscicultura, abastecimento de água, irrigação e navegação a jusante.

O atendimento à demanda de vazão mínima defluente normalmente traz um impacto na geração de energia, tanto pelas eventuais reduções nas reservas d'água no aproveitamento como pela elevação do nível do canal de fuga, reduzindo a queda líquida para geração.

A demanda de vazão mínima defluente é determinada de maneira a atender, simultaneamente, todos os usuários envolvidos. Deve-se minimizar as funções  $f_{d_t}$ , que representam os desvios das vazões defluentes em relação às vazões mínimas definidas para cada período, durante todo o horizonte de análise.

$$f_{d_t} = (dr_t - qa_t) \quad \forall t, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (7)$$

$$qa_t \triangleq qt_t + qv_t \quad (8)$$

Como definido anteriormente,  $qt_t$  e  $qv_t$  são as vazões turbinadas e vertidas respectivamente, e

$dr_t$  = demanda de vazão mínima no período  $t$  ( $m^3/s$ );

$qd_t$  = vazão defluente no período  $t$  ( $m^3/s$ ).

## G. Defluência Máxima

O controle de cheias a jusante do reservatório, exige além de um volume de espera, que as vazões defluentes não excedam limites definidos. Em cada intervalo de tempo, deve-se minimizar o desvio das vazões defluentes em relação a esses limites. Ou seja, deve-se minimizar as funções  $f_{D_t}$ ,

$$f_{D_t} = (q_{d_t} - d_{f_t}) \quad \forall t, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (9)$$

onde  $d_{f_t}$  é a demanda de vazão máxima no período  $t$  ( $m^3/s$ )

### 2.1.2 - Restrições do Problema

#### A. Conservação dos Fluxos

A conservação dos fluxos deve ser respeitada em todo o horizonte de análise. Ou seja,

$$V_t = V_{t-1} + \left( I_t - q_{e_t} - q_{t_t} - q_{v_t} - q_{a_t} - q_{i_t} \right) \Delta t, \quad \forall t \quad (10)$$

onde,

$I_t$  = vazão afluente no período  $t$  ( $m^3/s$ );

$q_{e_t}$  = vazão evaporada no período  $t$  ( $m^3/s$ );

$\Delta t$  = tempo em segundos do período  $t$  ( $10^6$  s).

Por conveniência, as variáveis referentes às vazões de usos múltiplos serão isoladas na equação (10), resultando,

$$q_{t_t} + q_{v_t} + q_{a_t} + q_{i_t} = I_t - q_{e_t} + \frac{1}{\Delta t} (V_{t-1} - V_t) \quad (11)$$

## B. Limites Físicos

A operação do reservatório está sujeita a limites físicos de vazões e volumes, máximos e mínimos, em cada período de tempo (t).

$$0 \leq q_{t_t} \leq \overline{q_{t_t}} \quad (12)$$

$$0 \leq q_{v_t} \quad (13)$$

$$0 \leq q_{a_t} \leq \overline{q_a} \quad (14)$$

$$0 \leq q_{i_t} \leq \overline{q_i} \quad (15)$$

$$\underline{V} \leq V_t \leq \overline{V} \quad (16)$$

onde,

$\overline{q_{t_t}}$  = máxima vazão turbinável no período t ( $m^3/s$ );

$\overline{q_a}$  = máxima vazão de abastecimento ( $m^3/s$ );

$\overline{q_i}$  = máxima vazão de irrigação ( $m^3/s$ );

$\underline{V}$  = volume mínimo de operação ( $Hm^3$ );

$\overline{V}$  = volume máximo de operação ( $Hm^3$ ).

### 2.1.3 - Formulação do Problema Multicritério

O problema multiobjetivo para determinação de uma política de operação otimizada, levando em conta os usos múltiplos da água, pode ser caracterizado como PMO,

$$\begin{array}{l}
 \text{MAX } f_g = K \sum_{t=1}^T \eta_t q_t (h_t - p_t) \\
 \\
 \text{MIN } f_{v_t} = (dv_t - qv_t) \\
 \\
 \text{MIN } f_{e_t} = (V_t - de_t) \\
 \\
 \text{MIN } f_{i_t} = (di_t - qi_t) \\
 \\
 \text{MIN } f_{a_t} = (da_t - qa_t) \\
 \\
 \text{MIN } f_{d_t} = \left( df_t - (qt_t + qv_t) \right) \\
 \\
 \text{MIN } f_{D_t} = \left( (qt_t + qv_t) - dF_t \right)
 \end{array}
 \quad \text{PMO} \quad \left\{ \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right. \quad \forall t, \quad t = 1, 2, \dots, T$$

Sujeito a:

$$qt_t + qv_t + qa_t + qi_t = I_t - qe_t + \frac{1}{\Delta t} (V_{t-1} - V_t)$$

$$\begin{array}{l}
 0 \leq qt_t \leq \overline{qt_t} \\
 0 \leq qv_t \\
 0 \leq qa_t \leq \overline{qa} \\
 0 \leq qi_t \leq \overline{qi} \\
 \underline{V} \leq V_t \leq \overline{V}
 \end{array}$$

Em geral, não é possível encontrar uma solução ótima para problemas multiobjetivos. O que se procura é obter soluções *eficientes* do problema, objeto de estudo das técnicas de otimização multicritério<sup>10</sup>. No próximo item são discutidos, resumidamente, os principais conceitos envolvidos na solução de problemas multiobjetivos.

<sup>10</sup> A denominação "multicritério" ou "multiobjetivo" é encontrada indistintamente na bibliografia.



## 2.2 - SOLUÇÕES EFICIENTES E CURVAS DE TRADE-OFF

### DE PROBLEMAS MULTIOBJETIVOS

Uma solução factível para um problema de otimização multicritério é chamada de *solução eficiente* (ou solução não dominada) se não é possível encontrar uma outra solução factível onde haja melhora no valor de uma das funções objetivo, sem que o valor de pelo menos uma outra função seja degradado. O conjunto de soluções eficientes é chamado de *conjunto eficiente* do problema (Chankong e Haimes, 1983).

Considere-se, por exemplo, a maximização, sobre o domínio dos reais, das funções  $f_1(x)$  e  $f_2(x)$ , representadas na Fig 1. Define-se o problema multiobjetivo P2,

$$P2 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{MAX } F(x) = [f_1(x) \quad f_2(x)] \\ \text{s/a} \\ x \in \mathbb{R}^1 \end{array} \right.$$

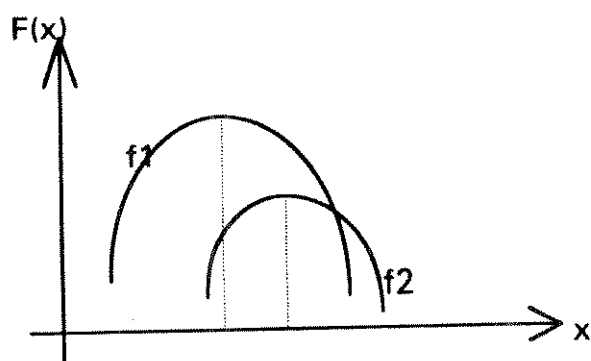


Fig 1 - Otimização Multicritério

Qualquer solução no intervalo situado entre as linhas tracejadas é uma solução eficiente e o intervalo entre elas é o conjunto eficiente do problema P2. As funções  $f_1(x)$  e  $f_2(x)$  possuem soluções ótimas bem definidas em  $\mathbb{R}^1$ , mas P2 não tem solução ótima. As soluções ótimas de  $f_1(x)$  e de  $f_2(x)$  são únicas, enquanto P2 possui infinitas soluções eficientes.

A curva de trade-off de um problema multiobjetivo representa os valores das funções objetivos para as soluções eficientes do problema. Em outras palavras, a curva de trade-off é a imagem do conjunto eficiente no espaço dos objetivos. A Fig 2 representa a curva de trade-off do problema P2.

A partir dos pontos interiores da curva de trade-off ( $x_i$ ) pode-se determinar direções de crescimento simultâneo das funções  $f_1$  e  $f_2$ . Nos pontos sobre a curva ( $x_f$ ), quando há crescimento de uma das funções, há decrescimento da outra.

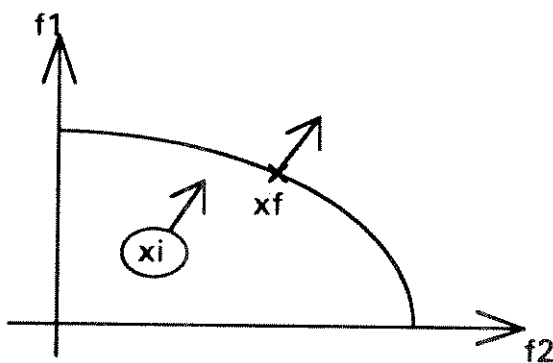


Fig. 2 - Curva de trade-off do problema multiobjetivo P2

Raramente é possível se encontrar uma solução ótima para problemas multiobjetivos, onde todos os objetivos sejam simultaneamente otimizados. Na

maior parte dos problemas, o conjunto eficiente e a curva de trade-off são utilizados como elementos para determinação de *soluções de compromisso* aceitáveis pelos usuários.

Em termos mais formais, seja o problema multiobjetivo  $P_n$ ,

$$P_n \quad \begin{cases} \text{MAX} & F(x) = [f_1(x) \quad f_2(x) \quad \dots \quad f_n(x)] \\ \text{s a} & \\ & x \in X \end{cases}$$

Um ponto  $x^* \in X$  é uma solução eficiente de  $P_n$  se não existir  $x^0 \in X$ ,  $x^0 \neq x^*$ , tal que,

$$\begin{aligned} f_1(x^0) &\geq f_1(x^*) \\ f_2(x^0) &\geq f_2(x^*) \\ &\vdots \\ f_n(x^0) &\geq f_n(x^*) \end{aligned}$$

e, para pelo menos um objetivo  $f_j(x)$ ,  $1 \leq j \leq n$ ,  $f_j(x^0) > f_j(x^*)$ .

### 2.3 - A REPARTIÇÃO DE CUSTOS E A SOLUÇÃO DO PROBLEMA MULTIOBJETIVO

As alternativas de compromisso que surgem da solução de problemas multiobjetivo permitem determinar o potencial de atendimento a cada objetivo considerado nas avaliações, função do recurso hídrico no local do aproveitamento. Assim, pode-se estimar o benefício esperado de cada usuário ao longo da vida útil do empreendimento.

Se a estratégia de operação do reservatório representa um compromisso eficiente entre os usuários, a repartição dos custos entre eles poderá ser feita de maneira mais clara, baseando-se nos benefícios de cada usuário. Se a

política operativa não é eficiente a avaliação dos benefícios é distorcido, dificultando a repartição dos custos.

Nos casos em que esses benefícios podem ser traduzidos em valores monetários, as valorizações econômicas dos benefícios, ao longo de toda vida útil do aproveitamento, representam limites superiores para os custos que os usuários se dispõem a pagar pela implantação e operação do empreendimento.

Nos casos em que a valorização econômica dos benefícios não é explícita, a repartição de custos entre os usuários deve surgir de negociações específicas entre eles, levando-se em conta as particularidades do projeto e as prioridades de utilização da água.

## **2.4 - ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA MULTIOBJETIVO (PMO)**

### **NA DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS OPERATIVAS DE RESERVATÓRIOS**

### **COM USOS MÚLTIPLOS**

Do ponto de vista do setor elétrico, a solução do problema PMO, formalizado no item 2.1, deve ser tal que permita uma avaliação energética adequada do aproveitamento, para o dimensionamento da usina, e ao mesmo tempo, garanta um atendimento aceitável dos demais usos d'água. Assim, é desejável abordar PMO por um método que evidencie a geração de energia no aproveitamento e forneça uma solução eficiente do problema. O método  $\epsilon$ -restrito (Chankong e Haimes, 1983), discutido com maior detalhe no capítulo III, é particularmente bem adaptado a esses requisitos.

O método mais usual para obter soluções eficientes de problemas multi-objetivo é o *método dos pesos* (Chankong e Haimes, 1983). Este método consiste em atribuir-se ponderações a cada função objetivo do problema, convertendo-o

num problema *mono-objetivo*, onde se otimiza a somatória das funções objetivos ponderadas. No entanto, a aplicação do método dos pesos em problemas com mais de duas funções objetivo é trabalhosa e pouco intuitiva. Além disso, no caso particular do problema PMO, a solução obtida pela aplicação do método dos pesos não permite evidenciar claramente os parâmetros energéticos do aproveitamento, uma vez que se otimiza a somatória das funções objetivos ponderadas.

Outro método muito empregado na solução de problemas multiobjetivos é o método denominado *goal programming* (programação por metas). Nesta metodologia são estabelecidas prioridades entre as funções objetivos do problema e definidos valores metas para cada uma delas (Chankong e Haimes, 1983). O processo de cálculo consiste em otimizar o atendimento à meta do objetivo mais prioritário, passando-se seqüencialmente à otimização das funções menos prioritárias, sob a restrição de não degradar o valor das funções de maior prioridade.

Embora a programação por metas aplicada ao PMO permita a avaliação explícita da geração de energia, o método pode não levar a alternativas de compromisso eficientes. Por outro lado, os objetivos menos prioritários serão avaliados apenas se não degradarem o valor dos objetivos mais prioritários.

A alternativa proposta neste trabalho para solução do problema multi-objetivo PMO, discutida no próximo capítulo, é baseada numa extensão do princípio de otimalidade da programação dinâmica, onde o problema é resolvido por uma seqüência de avaliações sucessivas, através do método  $\epsilon$ -restrito. A cada avaliação, resolve-se um problema multicritério de dimensão substancialmente reduzida em relação ao problema original.

## CAPÍTULO III

### OTIMIZAÇÃO DINÂMICA MULTICRITÉRIO NA SOLUÇÃO DO PROBLEMA PARA DEFINIR ESTRATÉGIAS OPERATIVAS DE RESERVATÓRIOS COM USOS MÚLTIPLOS

Neste capítulo discute-se a metodologia definida para solução do problema multicritério, PMO, associado à operação de reservatórios com usos múltiplos da água.

A metodologia baseia-se na utilização do método  $\epsilon$ -restrito e do princípio de otimalidade da programação dinâmica para resolução sucessiva de problemas com dimensões reduzidas.

No próximo item descreve-se o método  $\epsilon$ -restrito. No item 3.2 discute-se a aplicação do método ao problema PMO e no item 3.3 é utilizada a característica dinâmica de uma estratégia de operação de reservatórios definida ao longo de um horizonte de análise, para reduzir a dimensão de PMO.

#### 3.1 - MÉTODO $\epsilon$ -RESTRITO PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS MULTIOBJETIVOS

No método  $\epsilon$ -restrito, as soluções eficientes do problema multiobjetivo são obtidas através da formulação e resolução de problemas restritos adequados, gerados a partir do problema original.

O problema multiobjetivo é convertido num problema escalar pela escolha de um objetivo de referência a ser otimizado e transformando-se as demais

funções objetivo em restrições (Chankong e Haimes, 1983). Ou seja, a aplicação do método  $\epsilon$ -restrito, transforma o problema multiobjetivo em um problema mono-objetivo  $P(\epsilon)$ ,

$$P_k(\epsilon) \left\{ \begin{array}{l} \text{Min } f_k(x) \\ \text{s a} \\ f_j(x) \leq \epsilon_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad j \neq k \\ x \in X \end{array} \right.$$

onde,

$f_k(x)$  = objetivo de referência escolhido;

$X$  = conjunto de soluções factíveis;

$f_j(x)$  = funções objetivo originais do problema;

$\epsilon_j$  = restrição a ser atendida pela função objetivo  $f_j(x)$ .

Normalmente, se  $P_k(\epsilon^0)$  tiver pelo menos uma solução factível e se  $x^0$  for solução ótima única de  $P_k(\epsilon^0)$ , então  $x^0$  é uma solução eficiente do problema multiobjetivo (Chankong e Haimes, 1983).

Embora a escolha do conjunto adequado ( $\epsilon$ ) de restrições leve à obtenção de uma solução eficiente do problema, essa escolha geralmente não é uma tarefa trivial, podendo levar o problema  $P(\epsilon)$  à infactibilidade. Essa é a maior dificuldade para aplicação do método. No entanto esta dificuldade é contornada no problema de dimensionamento estudado neste trabalho.

### 3.2 - MÉTODO $\epsilon$ -RESTRITO APLICADO À DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIAS OPERATIVAS DE RESERVATÓRIOS COM USOS MÚLTIPLOS

Considerando-se a necessidade de evidenciar a geração de energia elé-

trica, a aplicação do método  $\varepsilon$ -restrito ao problema PMO leva naturalmente à escolha dessa função, como objetivo de referência para o critério de otimização. Assim, o problema  $P(\varepsilon)$  associado ao problema PMO, pode ser caracterizado como,

$$\begin{array}{l}
 P(\varepsilon) \left\{ \begin{array}{l}
 \text{MAX } f_g = K \sum_{t=1}^T \eta_t q_{t_t} (h_t - p_t) \\
 \text{sujeito a} \\
 \\
 f_{vt} = (dv_t - qv_t) \leq \varepsilon v_t \\
 \\
 f_{et} = (V_t - de_t) \leq \varepsilon e_t \\
 \\
 f_{it} = (di_t - qi_t) \leq \varepsilon i_t \\
 \\
 f_{at} = (da_t - qa_t) \leq \varepsilon a_t \\
 \\
 f_{dt} = \left( df_t - (qt_t + qv_t) \right) \leq \varepsilon d_t \\
 \\
 f_{Dt} = \left( (qt_t + qv_t) - dF_t \right) \leq \varepsilon D_t \\
 \\
 qt_t + qv_t + qa_t + qi_t = I_t - qe_t + \frac{1}{\Delta t} (V_{t-1} - V_t) \\
 \\
 0 \leq qt_t \leq \overline{qt_t} \\
 0 \leq qv_t \\
 0 \leq qa_t \leq \overline{qa} \\
 0 \leq qi_t \leq \overline{qi} \\
 \underline{V} \leq V_t \leq \overline{V}
 \end{array} \right. \quad \forall t, t = 1, 2, \dots, T
 \end{array}$$

Como discutido anteriormente, em 2.1.1, o volume meta definido para o aproveitamento num determinado período, pode eventualmente ser ultrapassado, dependendo da afluência ao reservatório. Ou seja, as restrições  $(V_t - de_t) \leq \varepsilon e_t$



podem ser violadas dentro de limites aceitáveis para manter o controle de cheias a jusante.

Dessa maneira, a restrição de volume meta no reservatório pode ser tratada como uma função de penalidade  $\Phi(V_t)$  (Luenberger, 1984; Hicks et al., 1974), definida por,

$$\Phi_t(V_t) = \begin{cases} (V_t - d_{e_t})^{\exp} & \text{para } V_t > d_{e_t} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (17)$$

onde,  $\exp$  é um expoente de penalidade definido pelo analista, função da importância do controle de cheias frente aos demais usos da água no aproveitamento.

Nessas condições, o problema  $P(\varepsilon)$  pode ser reescrito como  $PMP(\varepsilon)$ ,

$$\left. \begin{array}{l} \text{MAX } f_g = \sum_{t=1}^T \left( K \eta_t q_{t_t} (h_t - p_t) - \alpha_t \Phi_t(V_t) \right) \\ \text{sujeito a} \\ f_{v_t} = (dv_t - qv_t) \leq \varepsilon v_t \\ f_{l_t} = (dl_t - ql_t) \leq \varepsilon l_t \\ f_{a_t} = (da_t - qa_t) \leq \varepsilon a_t \\ f_{f_t} = (df_t - qf_t) \leq \varepsilon d_t \\ f_{D_t} = (qF_t - dF_t) \leq \varepsilon D_t \\ q_{t_t} + qv_t + qa_t + ql_t = I_t - q_{e_t} + \frac{1}{\Delta t} (V_{t-1} - V_t) \\ 0 \leq q_{t_t} \leq \overline{q_{t_t}} \\ 0 \leq qv_t \\ 0 \leq qa_t \leq \overline{qa} \\ 0 \leq ql_t \leq \overline{ql} \\ \underline{V} \leq V_t \leq \overline{V} \end{array} \right\} \quad \text{PMP}(\varepsilon) \quad \forall t, t = 1, 2, \dots, T$$

Onde  $\alpha_t$  são constantes de penalização adequadas.

A solução de PMP( $\epsilon$ ) fornece uma estratégia de operação do reservatório ao longo do horizonte de análise permitindo avaliar-se os aspectos energéticos do aproveitamento.

Esse problema possui uma única função objetivo e pode ser resolvido por diversas técnicas de otimização não linear. Optou-se por um método de avaliações sucessivas, baseado no princípio da otimalidade de programação dinâmica, discutido no item a seguir. Esta estratégia de solução permite que em cada avaliação seja resolvido um problema de dimensão substancialmente reduzida em relação ao problema original.

### 3.3 - AVALIAÇÕES SUCESSIVAS EM UM PROBLEMA MULTIOBJETIVO DINÂMICO

Em termos formais, o *princípio de otimalidade* da programação dinâmica (Bertsekas, 1987) estabelece que, se a trajetória ótima entre os pontos a e c passa pelo ponto b, como ilustra a Fig. 3, o trecho a-b é a trajetória ótima entre os pontos a e b. A demonstração deste princípio é trivial, normalmente realizada através de um raciocínio por contradição.

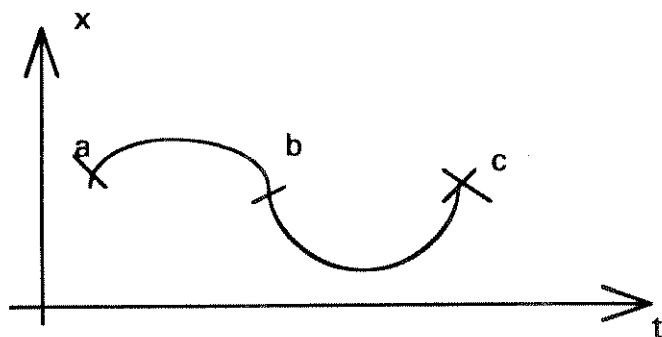


Fig. 3 - Princípio da otimalidade da programação dinâmica

O princípio da otimalidade é representado formalmente pela equação recursiva de otimalidade da programação dinâmica, avaliada no sentido direto (18), ou no sentido inverso (19),

$$f_t(x_t) = \max_{u_t} \left\{ l_t(x_t, u_t) + f_{t-1}(x_{t-1}) \right\} \quad (18)$$

$$f_t(x_t) = \max_{u_t} \left\{ l_t(x_t, u_t) + f_{t+1}(x_{t+1}) \right\} \quad (19)$$

onde,

$f_t(x_t)$  = benefício acumulado até o período  $t$  associado ao estado  $x_t$ ;  
 $l_t(x_t, u_t)$  = benefício da decisão  $u_t$  no estado  $x_t$ ;  
 $f_{t-1}(x_{t-1})$  e  $f_{t+1}(x_{t+1})$  = benefícios acumulados pelas decisões adotadas até o período  $t-1$  e a partir do período  $t+1$ , respectivamente.

Deve-se ressaltar que avaliação da equação reversiva no sentido direto só é possível quando a função de transição de estado for inversível.

Na terminologia usual da programação dinâmica, o sentido direto é chamado *forward* e o inverso *backward*.

Para solução do problema PMP( $\epsilon$ ) através de avaliações sucessivas, no sentido forward, baseadas no princípio da otimalidade da programação dinâmica, a equação recursiva pode ser descrita por,

$$f_t(V_t) = \max_q \left\{ PMP_t(\epsilon, q_t) + f_{t-1}(V_{t-1}) \right\} \quad (20)$$

Onde,

$q_t \triangleq q_t^t + q_v^t + q_a^t + q_i^t$  representa uma decisão eficiente no intervalo  $t$ .

Por outro lado,

$$V_{t-1} = \Delta t \left( q_{t_t} + q_{v_t} + q_{a_t} + q_{i_t} - I_t^+ q_{e_t} \right) + V_t \Rightarrow$$

$$\Rightarrow q_t = \frac{V_{t-1} - V_t}{\Delta t} + I_t - q_{e_t}.$$

e  $PMP_t(\varepsilon, q)$  representa a solução do seguinte problema,

$$PMP_t(\varepsilon, q) \left\{ \begin{array}{l} \text{MAX} \quad K \eta_t q_{t_t} (h_t - p_t) - \alpha_t \Phi_t(V_t) \\ \text{sujeito a} \\ q_{t_t} + q_{v_t} + q_{a_t} + q_{i_t} = q_t \\ (d_{v_t} - q_{v_t}) \leq \varepsilon_{v_t} \\ (d_{i_t} - q_{i_t}) \leq \varepsilon_{i_t} \\ (d_{a_t} - q_{a_t}) \leq \varepsilon_{a_t} \\ (d_{f_t} - q_{f_t}) \leq \varepsilon_{d_t} \\ (q_{F_t} - d_{F_t}) \leq \varepsilon_{D_t} \\ 0 \leq q_{t_t} \leq \overline{q_{t_t}} \\ 0 \leq q_{v_t} \\ 0 \leq q_{a_t} \leq \overline{q_a} \\ 0 \leq q_{i_t} \leq \overline{q_i} \\ \underline{V} \leq V_t \leq \overline{V} \end{array} \right.$$

$PMP_t(\varepsilon, q)$  é um compromisso de operação eficiente, associado à decisão  $q_t$ , adotada para o nível de armazenamento  $V_t$ , e  $f_{t-1}(V_{t-1})$  representa o benefício acumulado com a operação do reservatório até o intervalo  $t-1$ , associado ao nível de armazenamento  $V_{t-1}$ .

Pode-se considerar que a equação (20) representa uma extensão do princípio da otimalidade, expressando o *princípio da eficiência*, aplicável a problemas dinâmicos multiobjetivos.

De maneira análoga ao princípio de otimalidade, o *princípio da eficiência* estabelece que, se uma trajetória eficiente entre os pontos *a* e *c* passa pelo ponto *b*, o trecho *a-b* é uma trajetória eficiente entre *a* e *b*. A demonstração deste conceito também não apresenta qualquer dificuldade, podendo ser realizado por raciocínio de contradição.

### 3.4 - OBTENÇÃO DE UM COMPROMISSO EFICIENTE PARA OPERAÇÃO DO RESERVATÓRIO

Para obter um compromisso eficiente de operação do reservatório, a partir da solução do problema  $PMP_t(\epsilon)$ , o conjunto de restrições será escolhido de modo a representar um percentual de atendimento às demandas de usos não energéticos da água.

Tomando-se a função objetivo associada à vazão de vertimento no problema  $PMP_t(\epsilon, q)$ , por exemplo,

$$\begin{aligned} (dv_t - qv_t) &\leq \epsilon v_t \Rightarrow \\ \Rightarrow qv_t &\geq dv_t - \epsilon v_t \end{aligned}$$

Fazendo-se

$$dv_t - \epsilon v_t = \lambda dv_t$$

Resulta

$$qv_t \geq \lambda dv_t$$

de  $\lambda$  representa um percentual de atendimento à demanda  $dv_t$ .

Com um raciocínio análogo para as demais funções objetivo, o problema  $PMP_t(\epsilon, q)$ , é descrito por,

$$\begin{array}{l}
 \text{MAX} \quad K \eta_t q_{t_t} (h_t - p_t) - \alpha_t \Phi_t(V_t) \\
 \text{sujeito a} \\
 q_{t_t} + q_{v_t} + q_{a_t} + q_{i_t} = q_t \\
 q_{v_t} \geq \lambda d_{v_t} \\
 q_{a_t} \geq \lambda d_{a_t} \\
 q_{i_t} \geq \lambda d_{i_t} \\
 q_{t_t} + q_{v_t} \geq \lambda d_{r_t} \\
 q_{t_t} + q_{v_t} \leq [1+(1-\lambda)] d_{r_t} \\
 0 \leq q_{t_t} \leq \overline{q_{t_t}} \\
 0 \leq q_{v_t} \\
 0 \leq q_{a_t} \leq \overline{q_a} \\
 0 \leq q_{i_t} \leq \overline{q_i} \\
 \underline{V} \leq V_t \leq \overline{V}
 \end{array}
 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \text{PMP}_t(\epsilon, q)$$

A solução deste problema representa um compromisso eficiente de operação do reservatório no intervalo  $t$ , para um fator de atendimento às demandas de usos não energéticos da água ( $\lambda$ ).

Se o problema  $\text{PMP}_t(\epsilon, q)$  resultar infactível, será necessário reduzir o fator  $\lambda$ , ou as demandas de usos da água estão incoerentes com a capacidade do aproveitamento.

#### Obtenção da Solução Ótima de $\text{PMP}_t(\epsilon, q)$

Para um dado volume do reservatório, o problema  $\epsilon$ -restrito  $\text{PMP}_t(\epsilon, q)$  é adequadamente aproximado por um problema linear, cuja solução pode ser obtida pela aplicação das metodologias consagradas para resolução de problemas lineares. Entretanto, as particularidades do problema - função objetivo com variável única e a presença de uma restrição de igualdade, permitiram que se adotasse o procedimento analítico para resolução do problema, implementado na seqüência de passos descrita a seguir.

### Passo 1 - Análise de factibilidade do problema

Comparando-se os limites máximos e mínimos das variáveis de decisão, com os limites impostos a estas variáveis pelo conjunto  $\epsilon$  de restrições, analisa-se a factibilidade do problema. Caso seja observado que o problema não tem solução factível, o processo de cálculo é encerrado. Caso contrário, vai para 2.

### Passo 2 - Determinação da solução ótima

A única variável de decisão do problema que influencia o valor da função objetivo de  $PMP_t(\epsilon, q)$ , descrita em (21),

$$K \eta_t q_t (h_t - p_t) - \alpha_t \Phi_t(V_t) \quad (21)$$

é a vazão turbinada no período  $t$  ( $q_t$ ).

A variável  $q_t$  tem um limitante superior definido a cada intervalo  $t$ . Se for mantida nesse limite, a função objetivo do problema (21), estará no máximo valor possível para o período.

Nos casos em que a disponibilidade de água seja insuficiente para manter  $q_t$  em seu valor máximo, reduz-se  $q_t$ . Quando houver excesso, ele é acrescentado à vazão vertida ( $q_v$ ). O diagrama de blocos da Fig 4, ilustra esse procedimento.

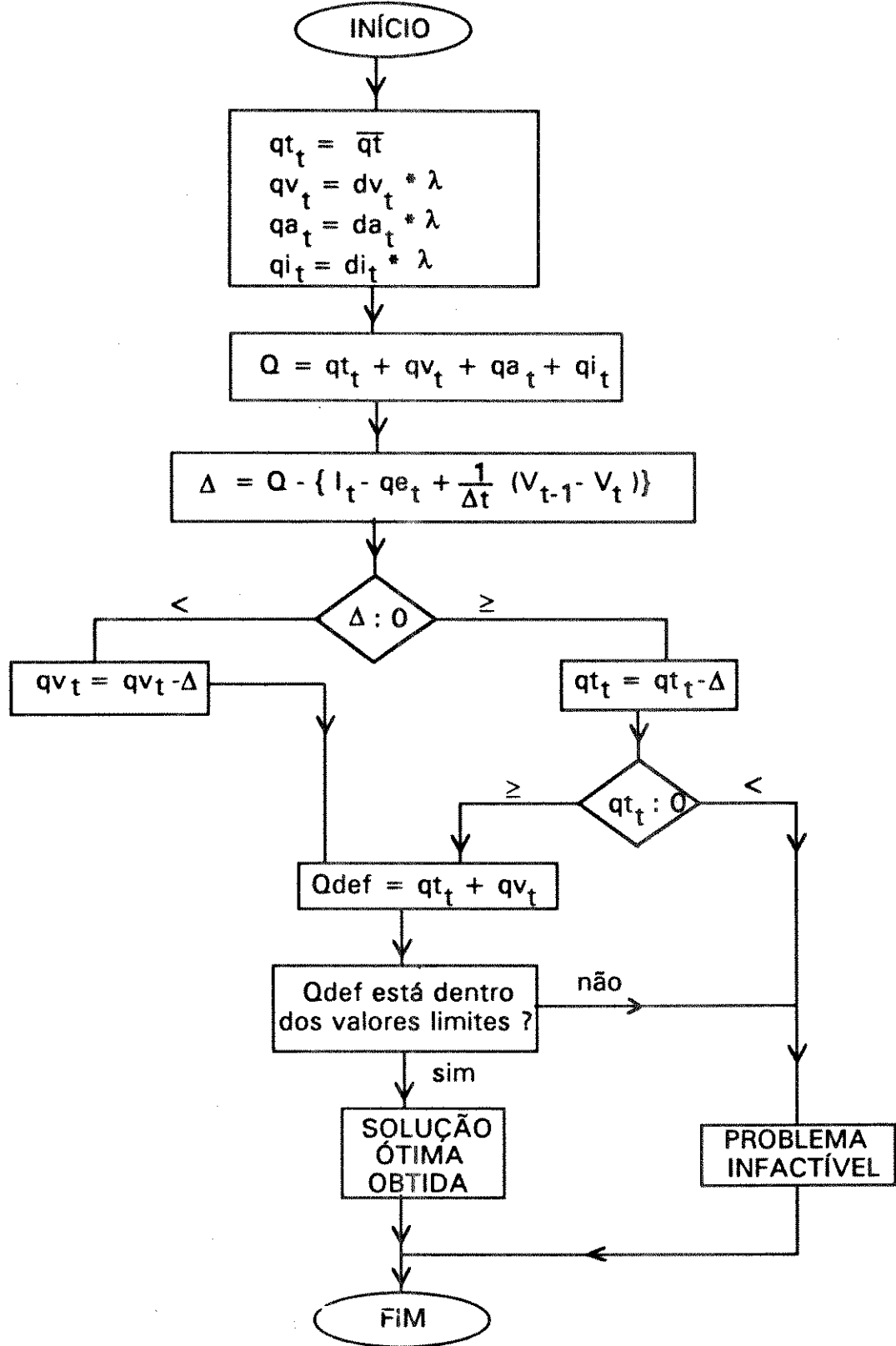


Fig. 4 - Diagrama de blocos



## CAPÍTULO IV

### ESTUDO DE CASO

Neste capítulo apresenta-se o dimensionamento da potência instalada num aproveitamento com usos múltiplos da água, empregando a metodologia de avaliação de projetos discutida nos capítulos anteriores.

O aproveitamento com usos múltiplos hipotético adotado nas avaliações foi denominado Formoso-H. Este aproveitamento tem dados característicos baseados na usina hidroelétrica de Formoso.

Será utilizado o enfoque determinístico, nas análises energéticas do aproveitamento. Considera-se o horizonte de maio/1951 a novembro/1956, correspondente ao período crítico do sistema interligado Sul/Sudeste.

Saliente-se que os resultados obtidos neste trabalho são de interesse puramente acadêmico, para efeito de avaliar a aplicação e sensibilidade da metodologia que se propõe.

No próximo item são apresentados os principais dados característicos do aproveitamento Formoso-H. No item 4.2 apresentam-se alguns resultados obtidos. Em 4.3 procede-se o dimensionamento da potência instalada. Alguns comentários são apresentados no item 4.4.

#### 4.1 - INFORMAÇÕES SOBRE O APROVEITAMENTO MÚLTIPLO ANALISADO

A usina hidroelétrica Formoso será implantada pela CEMIG no Rio São Francisco entre as usinas Três Marias e Sobradinho. A escolha deste aproveita-

mento para basear as avaliações foi motivado pelo fato da previsão de entrada em operação da usina estar fora do horizonte de contratação de energia entre as empresas do setor elétrico, definido como 1994 a 1997, para o ciclo de estudos de planejamento que se encerrou em 1993. Procurou-se desta forma, enfatizar o caráter hipotético das análises.

Alguns dados do aproveitamento múltiplo foram arbitrados, tais como a curva de rendimento do conjunto turbina/gerador, as demandas de usos múltiplos e a variação da perda hidráulica com a queda bruta disponível. Os rendimentos do conjunto turbina/gerador e as perdas hidráulicas foram consideradas uma função de queda do aproveitamento.

A seguir são apresentados os principais dados característicos do projeto analisado.

#### A. Aproveitamento Múltiplo Formoso-H

Queda de referência = 29,7 m

Canal de fuga médio = 484,3 m

Cota do reservatório:    máxima = 516,0 m  
                                 mínima = 511,5 m

Área do espelho d'água:    máxima = 324,1 km<sup>2</sup>  
                                 mínima = 259,2 km<sup>2</sup>

Volume do reservatório:    máximo = 4047 Hm<sup>3</sup>  
                                 mínimo = 2737 Hm<sup>3</sup>

Custo de implantação com 300 MW sem juros durante a construção (jdc):  
659,3 10<sup>6</sup> US\$ (ref. dez/1992)<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> Obtido do Plano Plurimal de Investimento do Setor Elétrico - PPE 94/98.

### Demandas mensais de usos múltiplos

mês	Vazão vertida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão p/ abastec. (m <sup>3</sup> /s)	Vazão p/ irrigação (m <sup>3</sup> /s)	Vazão mínima (m <sup>3</sup> /s)	Vazão máxima (m <sup>3</sup> /s)	Volume meta (Hm <sup>3</sup> )
1	8,00	15,00	14,00	90,00	9860,00	3210,20
2	13,00	12,00	17,00	90,00	9860,00	3714,50
3	18,00	10,00	19,00	90,00	9860,00	3725,50
4	8,00	15,00	14,00	90,00	9860,00	3798,80
5	13,00	12,00	17,00	90,00	9860,00	4000,00
6	18,00	10,00	19,00	90,00	9860,00	4047,00
7	8,00	15,00	14,00	90,00	9860,00	4047,00
8	13,00	12,00	17,00	90,00	9860,00	4047,00
9	18,00	10,00	19,00	90,00	9860,00	3950,70
10	8,00	15,00	14,00	90,00	9860,00	3725,50
11	13,00	12,00	17,00	90,00	9860,00	3714,50
12	18,00	10,00	19,00	90,00	9860,00	3210,20

### Vazões afluentes médias mensais

ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1951					727	592	565	547	551	540	539	610
1952	717	1591	3520	1451	740	593	572	591	604	557	616	882
1953	616	665	855	733	561	537	524	517	526	532	557	720
1954	603	605	580	533	522	505	505	510	508	507	618	591
1955	588	574	535	657	508	506	508	511	521	407	522	640
1956	720	552	765	562	559	565	531	526	518	522	620	

vazão máxima = 3520 m<sup>3</sup>/s

vazão mínima = 407 m<sup>3</sup>/s

vazão média = 656 m<sup>3</sup>/s

As vazões afluentes ao reservatório são vazões regularizadas, obtidas de uma simulação com o modelo a usinas individualizadas (Eletrobrás, 1979). Os demais dados característicos do aproveitamento são apresentados no apêndice 2.

## 4.2 - RESULTADOS OBTIDOS

As análises efetuadas compreendem simulações do aproveitamento Formoso-H, partindo-se de uma potência instalada de 20 a 800 MW, com intervalo de 30 MW. Foram consideradas fatores de atendimento ( $\lambda$ ) iguais a 0%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95% e 100%<sup>12</sup> para suprimento das demandas de usos não energéticos do reservatório. Os resultados dessas simulações, com os principais parâmetros energéticos do aproveitamento, são apresentados nos gráficos a seguir (As mesmas informações são apresentadas com maior precisão nas tabelas do apêndice 3).

O gráfico 1 apresenta a energia gerada em função da potência instalada na usina para o caso de não atendimento à demanda de usos não energéticos (F0) e suprindo de 100% dessa demanda (F100). Pode-se observar que a diminuição na energia gerada devido ao suprimento de usos não energéticos é sensível para o aproveitamento.

No gráfico 2 são apresentadas as variações nas energias geradas devido à inclusão de usos não energéticos no reservatório para o suprimento a essas demandas com fatores de 70%, 75%, 80%, 85%, 90% e 95%. O objetivo destas curvas é mostrar a sensibilidade da energia gerada no aproveitamento frente aos demais usos da água.

Obtidas as trajetórias operativas eficientes para cada valor de potência instalada e fator de atendimento às demandas não energéticas, foram calculados os volumes médios do reservatório ao longo dessas trajetórias. O gráfico 3 mostra a evolução dos volumes médios das trajetórias operativas com o fator 0% e 100%. Observa-se que a utilização do reservatório é sensivelmente maior

---

<sup>12</sup> Nos gráficos são denominados F0, F70, F75, ... F100

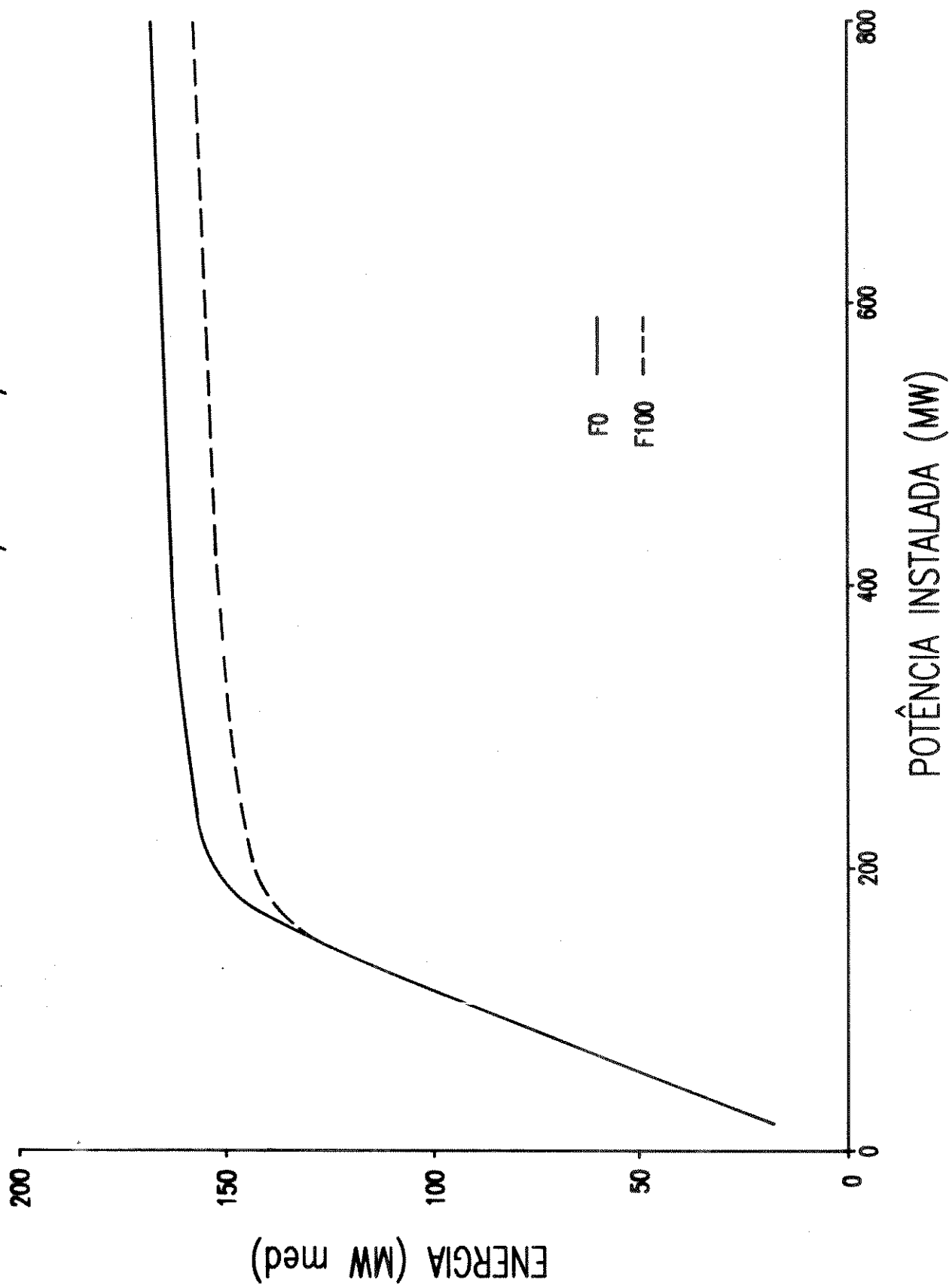
no caso de atendimento dos usos múltiplos.

No gráfico 4 mostra-se a variação da vazão turbinada com a potência instalada e com as demandas de usos múltiplos. Observa-se que as curvas acompanham os perfis da curva de geração de energia. A queda líquida manteve-se praticamente constante em todos os casos simulados (resultados no apêndice 3). Assim, pode-se afirmar que a diminuição na energia gerada é devida basicamente à perda de vazão turbinada e não à perda de queda líquida disponível no aproveitamento.

O gráfico 5 mostra a evolução das vazões médias associadas aos usos não energéticos da água com o fator de atendimento às suas demandas. Observa-se deste gráfico que mesmo sem usos múltiplos existe uma vazão de vertimento não nula no reservatório.

# GRÁFICO 1 - ENERGIA MÉDIA GERADA

UHE FORMOSO-H 5/51 A 11/56



# GRÁFICO 2 – ENERGIA MÉDIA GERADA

UHE FORMOSO–H 5/51 A 11/56

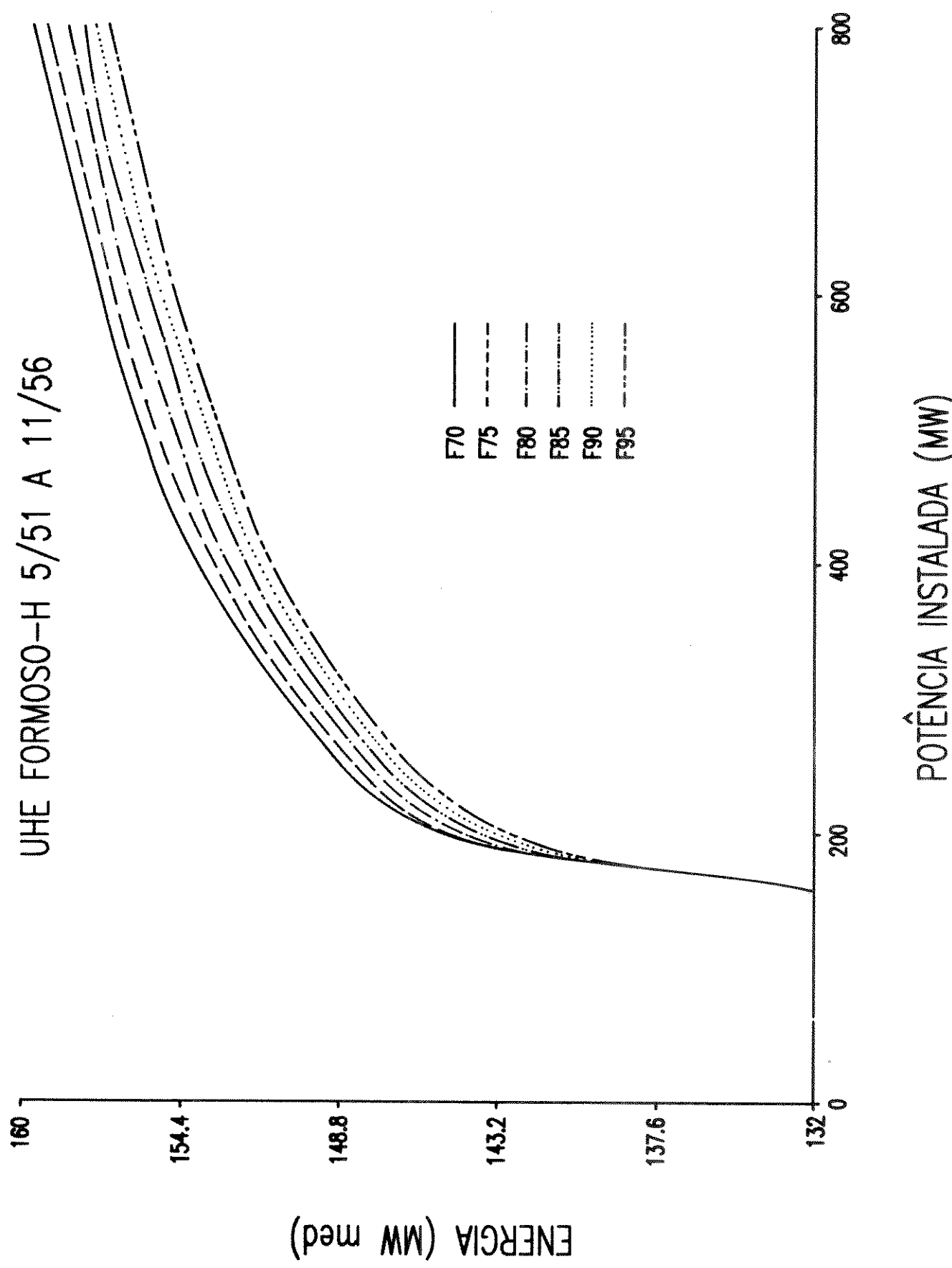
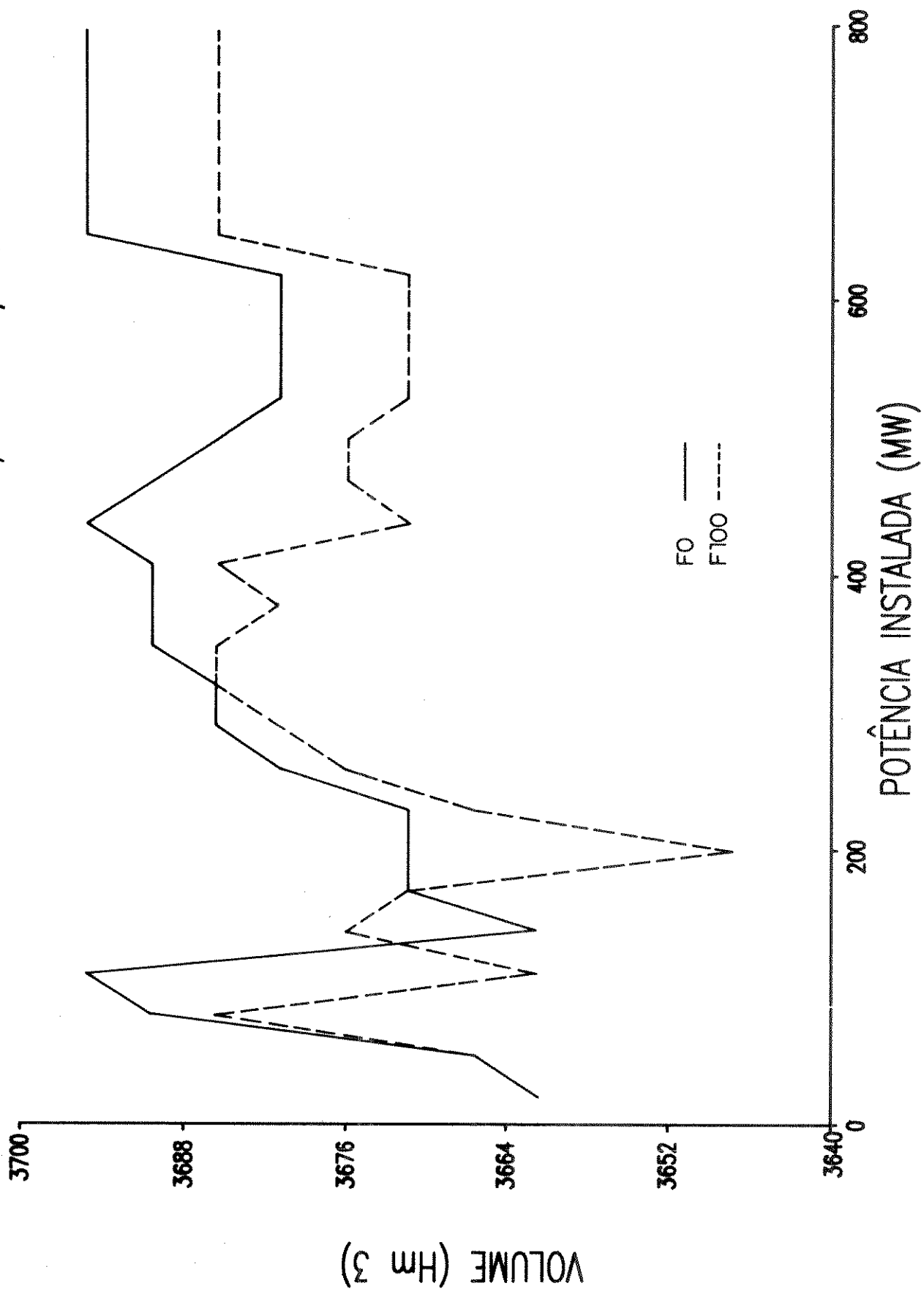


GRÁFICO 3 – VOLUME MÉDIO DA TRAJETÓRIA  
UHE FORMOSO-H 5/51 A 11/56





# GRÁFICO 4 - VAZÃO MÉDIA TURBINADA

## UHE FORMOSO-H 5/51 A 11/56

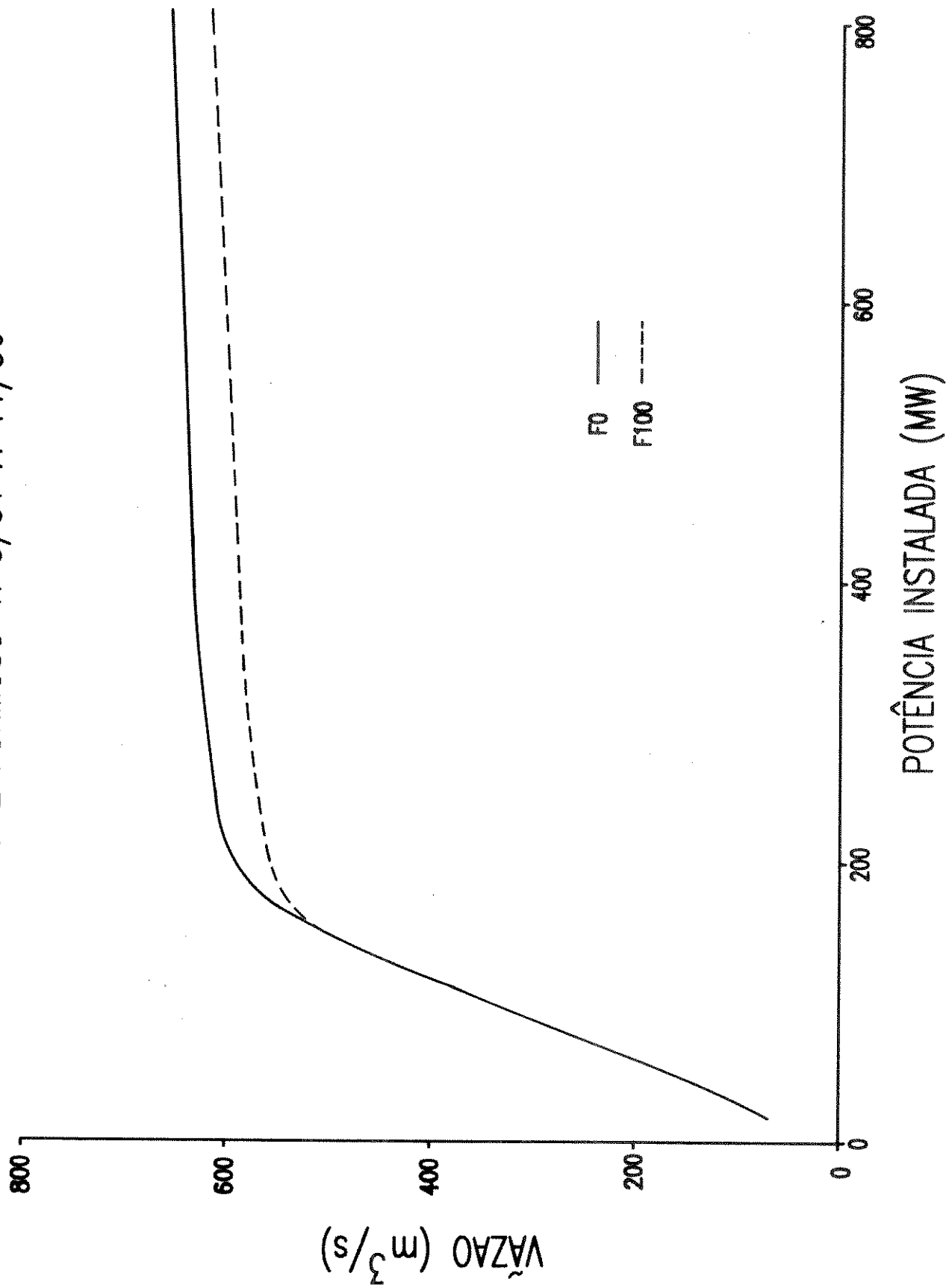
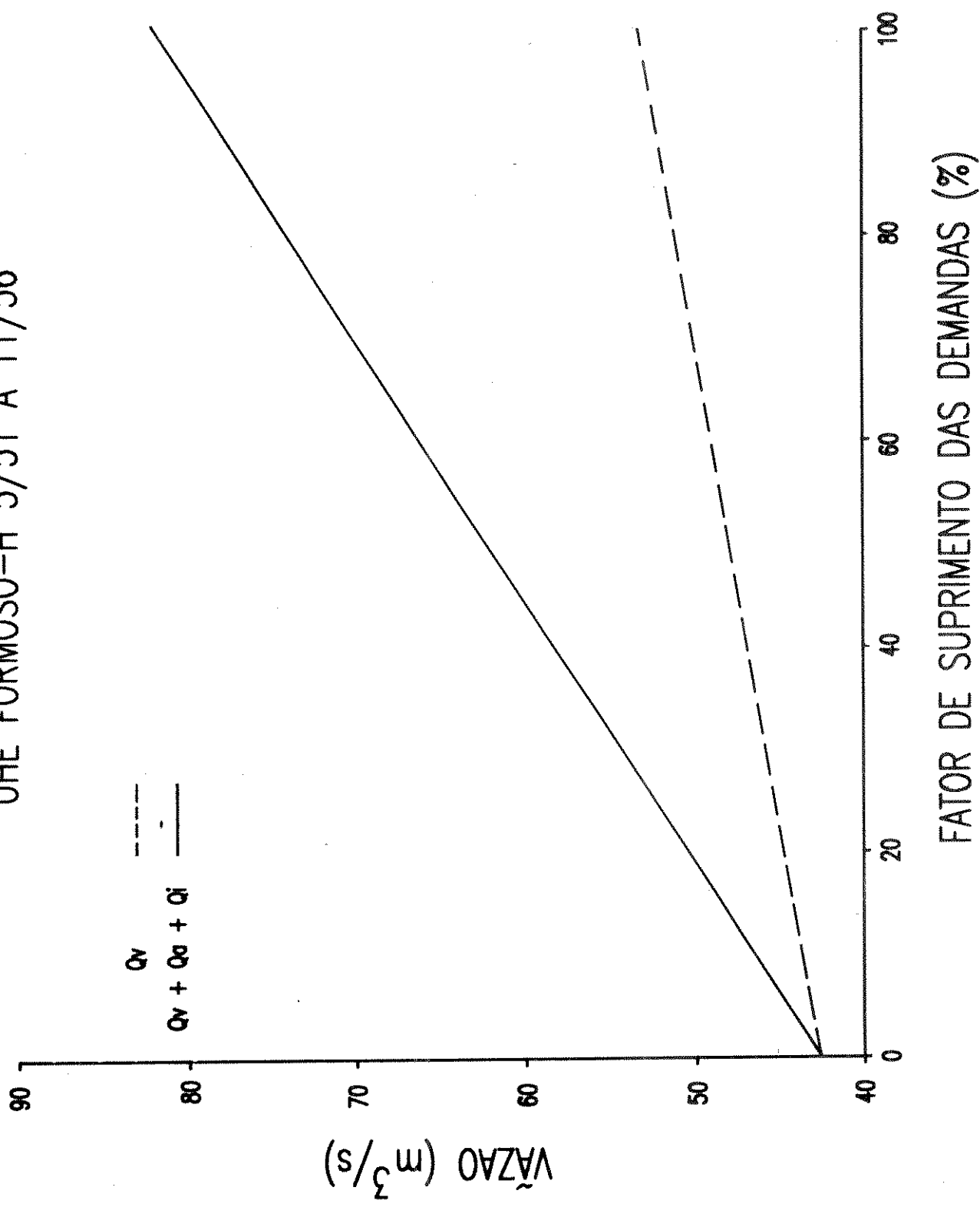


GRÁFICO 5 - ATENTIMENTO AOS USOS MÚLTIPLOS  
UHE FORMOSO-H 5/51 A 11/56



### 4.3 - DIMENSIONAMENTO DA POTÊNCIA INSTALADA NA USINA

O dimensionamento da potência instalada no aproveitamento Formoso-H será feito empregando-se uma análise de custo/benefício incremental sobre os benefícios e custos energéticos da obra.

#### 4.3.1 - Benefícios Energéticos

Os benefícios energéticos associados à motorização de uma usina compõem-se de benefícios de energia e de ponta garantidas. A valorização econômica desses benefícios é feita a partir dos montantes de energia e ponta disponíveis no aproveitamento e dos custos marginais de expansão, definidos como o custo incorrido pelo setor elétrico para expandir sua capacidade instalada em uma unidade adicional de energia ou de ponta.

Os resultados obtidos pela ELETROBRÁS na elaboração do "Plano 2015"<sup>13</sup> indicam que o custo marginal de ponta é nulo. Este resultado indica que a longo prazo, a expansão na energia disponível atende às necessidades de expansão de potência. Nessas condições, todo o benefício econômico associado à motorização do aproveitamento é função unicamente do ganho de energia associado.

O gráfico 1 mostra que o *intervalo de saturação* do ganho de energia gerada no aproveitamento está entre 170 e 300 MW de potência instalada, indicando que a potência a ser instalada na usina deverá estar neste intervalo. Assim, os benefícios energéticos serão calculados nessa faixa de potência instalada para fatores de atendimento aos demais usos da água de 0%, 70% e 100%.

---

<sup>13</sup> Planejamento da expansão de longo prazo

Análises idênticas poderiam ser feitas para os outros casos simulados.

A Tabela 1, a seguir, resume os ganhos energéticos para potências instaladas dentro do intervalo analisado.

Tabela 1 - Benefícios energéticos (MWmed)

Potência Instalada (MW)	Fator $\lambda$ (%)					
	0		70		100	
	Total	Inc	Total	inc	Total	inc
170	143,20	143,20	139,21	139,21	137,67	137,67
200	152,30	9,10	145,89	6,18	142,74	5,07
230	155,26	2,96	147,94	2,55	144,87	2,13
260	156,33	1,07	149,16	1,22	146,09	1,22
290	157,49	1,16	150,24	1,08	147,18	1,09

Os ganhos energéticos são valorizados economicamente ao longo de toda a vida útil do aproveitamento, através do custo marginal de dimensionamento, que representa o custo para o setor elétrico expandir sua capacidade de geração de 1 MWh no período correspondente.

Para o dimensionamento da usina Formoso-H considerou-se o custo marginal de dimensionamento de 67 US\$/MWh, correspondente ao período de 1996 a 2000, calculado a partir de uma atualização monetária, para dez/92, do custo marginal determinado no boletim de planejamento da ELETROBRÁS, publicado em 1985.

Nessas condições, os benefícios econômicos para o setor elétrico, associados à motorização da usina, podem ser calculados por,

$$BEC = \Delta E * CME * Nh * (frc)^{-1} \quad (22)$$

onde,

$\Delta E$  = benefício energético incremental (MW);

CME = custo marginal de dimensionamento de energia (US\$/MWh);

Nh = número de horas em um ano, 8760 (h/ano)

frc = fator de recuperação de capital para uma taxa anual de 10 % e uma vida útil econômica do aproveitamento de 50 anos.

A Tabela 2, a seguir, apresenta a valorização econômica dos benefícios energéticos incrementais para o aproveitamento Formoso-H.

Tabela 2 - Benefícios econômicos incrementais ( $10^6$  US\$ - dez/92)

Potência Instalada (MW)	Fator $\lambda$ (%)		
	0	70	100
170	833,31	810,09	801,13
200	52,95	35,96	29,50
230	17,22	14,84	12,39
260	6,23	7,10	7,10
290	6,75	6,28	6,34

#### 4.3.2 - Custos de Motorização

Baseando-se no custo de implantação do aproveitamento com juros durante a construção (jdc) estimados em 20%, pode-se dizer que o custo de motorização do aproveitamento Formoso-H é de aproximadamente 2650 US\$/kW.

Nessas análises será considerando que 40% desse custo é variável com a potência instalada na usina. Os 60% restantes são considerados fixos. Serão desprezados os custos de operação e manutenção, para simplificar os cálculos.

Admitindo-se que haja uma repartição de custos bem definida entre os usuários, tal que 3% dos custos fixos sejam pagos pelos usuários não energéticos no caso da do fator de atendimento de 70% e que essa taxa seja de 5% para atendimento de 100%, os custos de motorização da usina resultam nos valores

descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Custos de motorização do aproveitamento ( $10^6$  US\$)

Potência Instalada (MW)	Fator $\lambda$ (%)					
	0		70		100	
	Total	Inc	Total	inc	Total	inc
170	657,20	657,20	642,89	642,89	633,35	633,35
200	689,00	31,80	674,68	31,80	665,15	31,80
230	720,80	31,80	706,49	31,80	696,95	31,80
260	752,60	31,80	738,29	31,80	728,75	31,80
290	784,40	31,80	770,09	31,80	760,55	31,80

A repartição de custos, como definida, não interfere nas análises incrementais, tendo influência apenas nos custos totais da obra, ressaltando que os custos de motorização do aproveitamento são específicos do setor elétrico.

#### 4.3.3 - Análise da Relação Custo/Benefício Incremental

Calculados os custos e benefícios incrementais associados a cada potência instalada na usina, pode-se definir a melhor potência a ser instalada no aproveitamento.

Tabela 4 - Análise de custo/benefício incremental

Potência Instalada (MW)	Fator $\lambda$ (%)								
	0			70			100		
	B	C	B/C	B	C	B/C	B	C	B/C
170	833,31	657,20	1,27	810,09	642,89	1,26	801,13	633,35	1,26
200	52,95	31,80	1,67	35,96	31,80	1,13	29,50	31,80	0,93
230	17,22	31,80	0,54	14,84	31,80	0,47	12,39	31,80	0,39
260	6,23	31,80	0,20	7,10	31,80	0,22	7,10	31,80	0,22
290	6,75	31,80	0,21	6,28	31,80	0,20	6,34	31,80	0,20

A análise de custo benefício incremental define que o incremento de custo deve ser aceito enquanto a relação B/C (benefício/custo) for maior que a unidade.

Pelos resultados apresentados na Tabela 4, pode-se concluir que vale a pena incrementar a motorização da usina até 200 MW, tanto para o fator de atendimento às demandas não energéticas de 0% quanto para o fator de 70%. Para o fator de atendimento de 100%, a potência instalada no aproveitamento deve ser de 170 MW.

Pode-se determinar a curva de compromisso entre os fatores de atendimento dos usos múltiplos não energéticos e a potência instalada no aproveitamento. O gráfico 6 ilustra esta curva para o caso estudado.

O atendimento aos usos não energéticos da água impõe perdas financeiras ao setor elétrico. Essas perdas apresentadas na Tabela 5 e ilustrada no gráfico 7, são calculadas a partir das reduções de benefícios, fornecidas pela Tabela 2.

Tabela 5 - Perdas do setor elétrico pelo atendimento aos usos múltiplos > 10<sup>6</sup>US\$

Potência Instalada (MW)	Fator $\lambda$ (%)		
	0	70	100
170	0	23,22	32,18
200	0	40,21	55,63
230	0	42,59	60,46
260	0	41,72	59,59
290	0	42,19	60,00

Os gráficos 6 e 7 traduzem informações fundamentais para negociação do setor elétrico com os demais setores, para definir o dimensionamento da usina e o fator de atendimento aos usuários do reservatório.

Em um caso real de dimensionamento, seria recomendável que o intervalo de discretização utilizado para incremento da potência instalada na usina fosse reduzido de 30 para 10 MW, por exemplo, entre as potências de 170 e 230 MW, visando uma avaliação mais detalhada neste intervalo.



GRÁFICO 6 – CURVA DE COMPROMISSO  
UHE FORMOSO – H

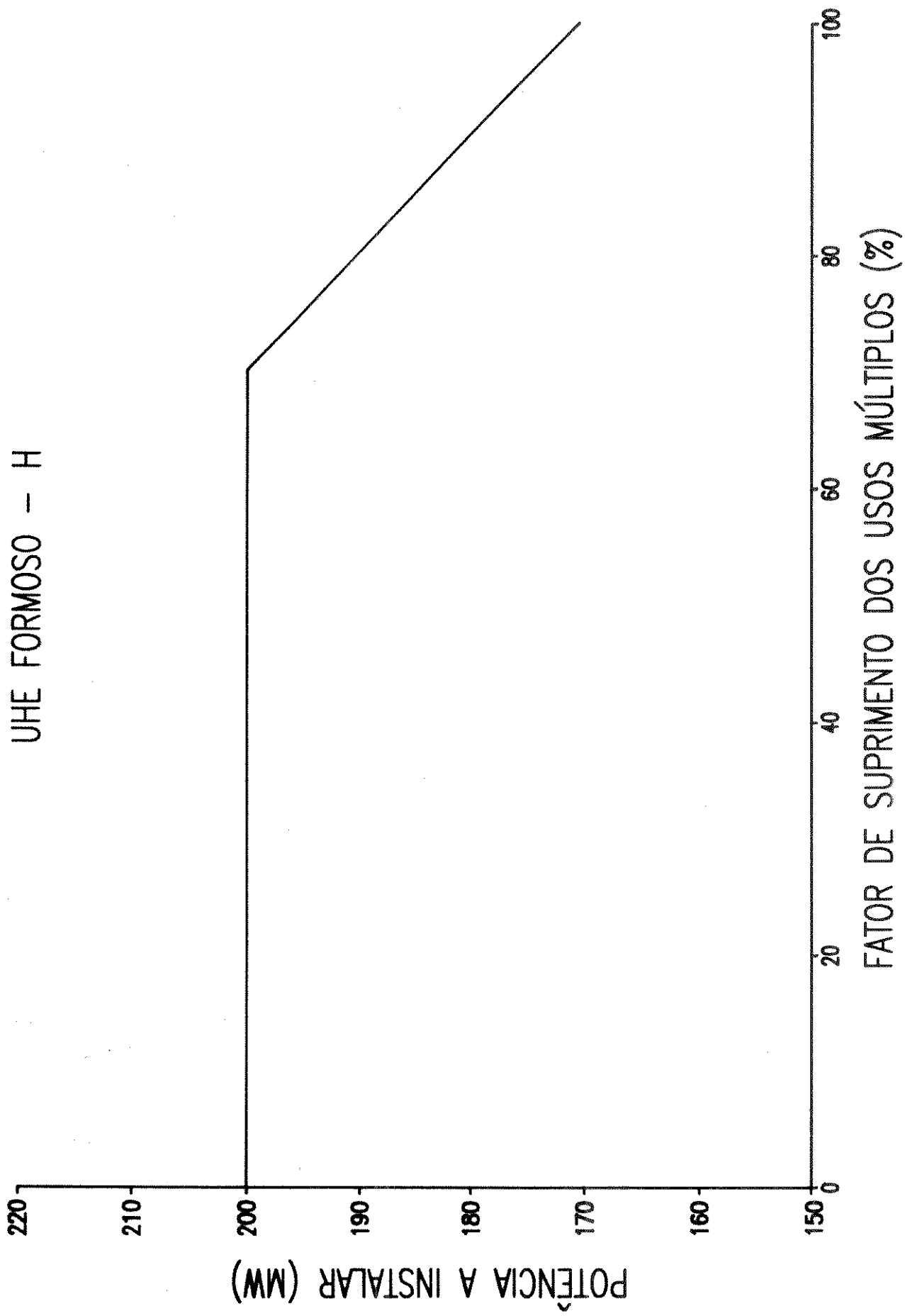
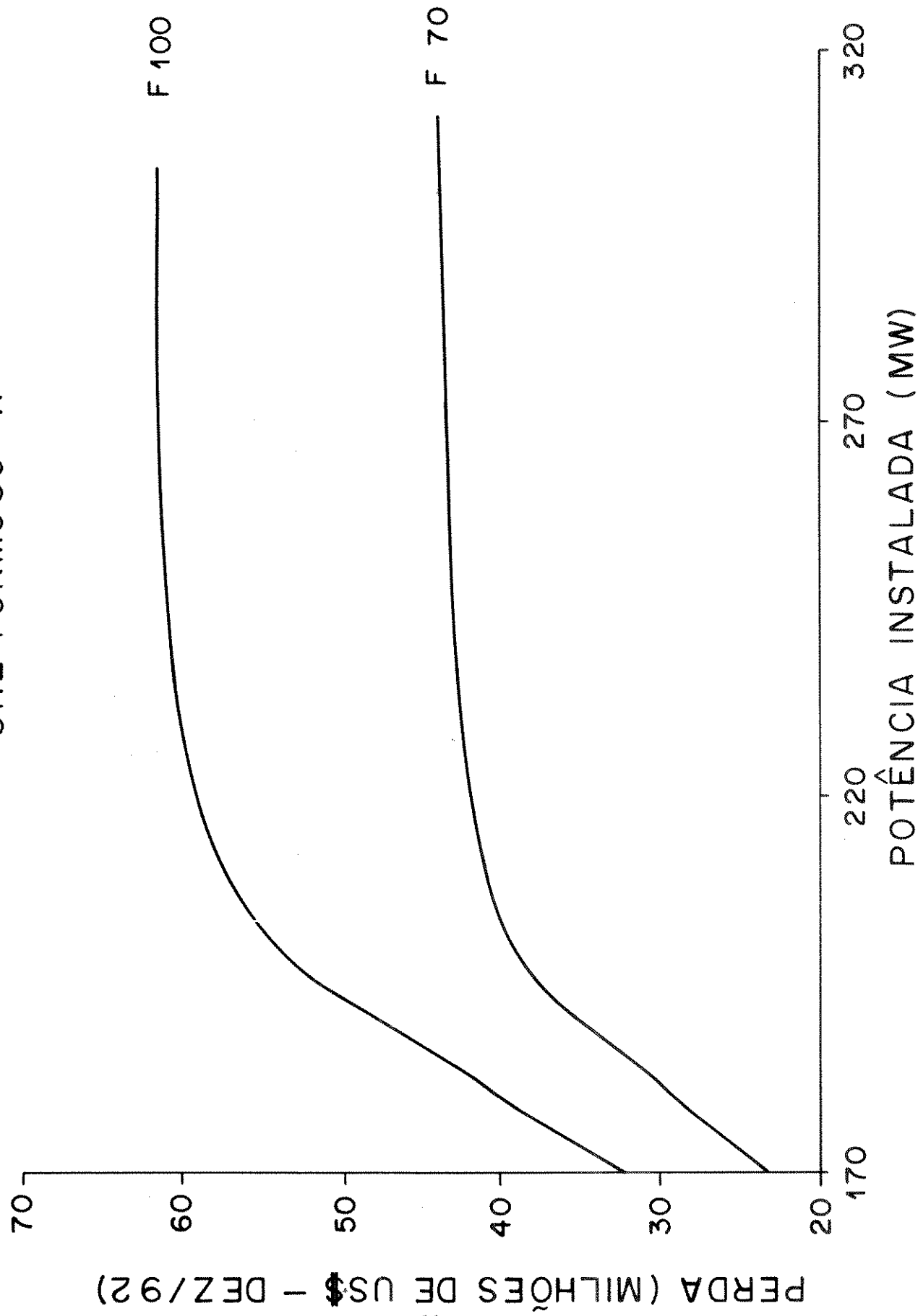


GRÁFICO 7 - PERDAS DO SETOR ELÉTRICO  
UHE FORMOSO-H



#### 4.4 - COMENTÁRIOS

A aplicação da metodologia proposta neste trabalho apresenta elementos para negociação entre o setor elétrico e os demais usuários de um aproveitamento com usos múltiplos, através do levantamento das curvas de compromisso entre os parâmetros energéticos e os fatores de atendimento aos demais usos da água. Foi também possível determinar as perdas do setor elétrico frente aos demais setores.

O estudo de caso exemplifica o dimensionamento da potência instalada. No entanto, a metodologia pode ser usada para dimensionar todos os parâmetros energéticos do aproveitamento.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia de análise de aproveitamentos hidroelétricos com usos múltiplos da água. Os resultados obtidos com o estudo de caso demonstraram que a energia retirada de um aproveitamento múltiplo é sensível à demanda de usos não energéticos da água, com impacto sobre a potência economicamente viável, a ser instalada na usina. A metodologia apresentada permite avaliar este impacto, podendo-se empregar o enfoque determinístico ou probabilístico, de acordo com o interesse do analista.

O critério para dimensionamento da usina, empregado neste trabalho, baseou-se na utilização da metodologia apresentada, para divisão eficiente dos recursos hídricos do reservatório. Adotou-se uma análise de custo/benefício incremental dos ganhos energéticos associados à parcela de recursos destinada ao aproveitamento energético. Embora esse critério deva ser discutido de maneira mais ampla para análise de aproveitamentos com usos múltiplos, ele é coerente com os métodos atualmente empregados na análise e dimensionamento de usinas.

A repartição de custos influencia o investimento de cada usuário na implantação e operação do aproveitamento, mas os custos específicos de cada setor, como é o caso do custo para motorização dos aproveitamentos, não se alteram. Caso contrário, estaria caracterizada a transferência de recursos financeiros de um setor para outro.

A metodologia foi desenvolvida para um único reservatório. Sua extensão para um sistema de aproveitamentos múltiplos não é limitada do ponto de vista teórico, mas pelo esforço de cálculo necessário para aplicá-la.

Muitos aproveitamentos múltiplos podem ser avaliados isoladamente do sistema, especialmente os de pequeno porte. Nos casos em que a interação entre o sistema e o aproveitamento é significativa, pode ser necessário a adoção de representações aproximadas, ou a adaptação da metodologia apresentada. Esses casos serão objeto de trabalhos futuros.

## APÊNDICE 1

### A1 - MODO DE OPERAÇÃO E REPRESENTAÇÃO DO RESERVATÓRIO

A metodologia para avaliação de projetos com usos múltiplos da água proposta neste trabalho foi implementada para um sistema composto de um único reservatório.

Embora sua adaptação para um sistema de vários reservatórios possa ser feita no futuro, no dimensionamento de uma usina, em muitos casos, a simulação isolada do restante do sistema é válida. Para isso devem ser tomadas as devidas precauções quanto ao efeito de remanso do reservatório imediatamente a jusante da usina e quanto à regularização de vazão da cascata a montante do aproveitamento em foco.

As principais características do modo implementado para operação do reservatório são destacadas a seguir:

#### A1.1 - Representação do Reservatório

Optou-se pela utilização de tabelas com os dados respectivos de cota, área e volume do reservatório ao invés de funções polinomiais obtidas a partir desses dados. Esta opção permite trabalhar com os dados efetivamente medidos e planimetrados do relevo do reservatório.

A utilização direta das tabelas vem no sentido de aumentar a precisão nos cálculos efetuados. Por exemplo, um ponto erroneamente tabelado terá influência apenas nos cálculos efetuados na sua vizinhança, enquanto que o polinômio

gerado a partir da tabela será afetado pelo erro e o expandirá aos demais pontos.

#### A1.2 - Aproximação por Tronco de Prisma

É necessária a definição de um critério associado à utilização de tabelas, para caracterizar a relação de cotas, áreas e volumes no reservatório, em pontos intermediários, não tabelados.

Como critério de aproximação considerou-se que entre dois pontos medidos consecutivos, o reservatório é representado por um tronco de prisma com secção trapezoidal. Nessas condições, para determinar os valores de cota, área e volume entre dois pontos medidos, adota-se uma variação linear da área e conseqüentemente, uma variação quadrática do volume.

Pode-se demonstrar que, dado um volume  $V$ , compreendido entre os volumes  $V_1$  e  $V_2$ , (tabelados), a cota do reservatório correspondente a  $V$  é dada por  $C$ ,

$$C = C_1 + \frac{C_2 - C_1}{A_2 - A_1} \left( \sqrt{A_1^2 + \frac{2(A_2 - A_1)}{C_2 - C_1} (V - V_1)} - A_1 \right) \quad (23)$$

$C_1, A_1$  = cota e área correspondentes ao volume  $V_1$  (valores conhecidos)

$C_2, A_2$  = cota e área correspondentes ao volume  $V_2$  (valores conhecidos)

#### A1.3 - Rendimento do Conjunto Turbina/Gerador e Perda Hidráulica

Na simulação energética do reservatório, considera-se uma tabela de rendimentos e perdas hidráulicas variáveis com a queda bruta disponível no

aproveitamento.

O rendimento de uma turbina é variável com a queda e a potência. Assim, a melhor representação dessas variações seria através de uma "família" de tabelas parametrizadas na potência disponível.

Entretanto, para o desenvolvimento deste trabalho, foi considerada uma única tabela. Entende-se que os resultados obtidos, embora não ideais, são mais precisos do que os resultados obtidos com um rendimento médio e uma perda hidráulica constante para toda a faixa operativa do reservatório. Para os valores intermediários, não tabelados, são adotadas interpolações lineares.

#### **A1.4 - Cálculos Energéticos**

A programação dinâmica empregada no cálculo da trajetória de operação do reservatório implica em considerar-se valores discretizados para o volume do aproveitamento. Em toda a trajetória, o volume do reservatório será sempre um desses valores discretizados (estados factíveis da programação dinâmica). A cota do reservatório é a correspondente ao volume médio entre o início e o final de cada período analisado.

Para se determinar a queda bruta e conseqüentemente a perda hidráulica e o rendimento do conjunto turbina/gerador, para efeito de geração de energia e cálculo da potência disponível na usina, são executadas iterações, em número definido pelo usuário. Nessas iterações, inicializa-se a cota de jusante do reservatório como o nível médio do canal de fuga da usina, determinando-se a vazão defluente e a geração de energia para este nível de jusante. Nas iterações seguintes, considera-se o nível de jusante calculado a partir da vazão defluente da iteração anterior.



A queda bruta final, considerada nos cálculos energéticos, é a diferença entre a cota do reservatório e a cota do canal de fuga calculado na penúltima iteração.

Além disso, são adotados valores de TEIF (taxa efetiva de indisponibilidade forçada) e IP (indisponibilidade programada) a serem descontados da disponibilidade. A ponta disponível no aproveitamento é calculada com base no tipo de turbina adotada e na potência instalada, segundo a equação (24), a seguir.

$$P_d = P_i (1-TEIF) (1-IP) \left( \frac{H_1}{H_{ref}} \right)^B \quad (24)$$

onde,

$P_d$  = potência disponível no aproveitamento (MW);

$P_i$  = potência instalada (MW);

$H_1$  = queda líquida disponível para geração (m);

$H_{ref}$  = queda de referência das turbinas (m);

$B$  = expoente que depende do tipo de turbina (pu).

### A1.5 - Vazão Evaporada

Determina-se a vazão evaporada,  $q_e$ , em cada estado da trajetória de operação, a partir de dados mensais de evaporação e da área correspondente ao volume médio entre o inicial e final. Assim,

$$q_e = \frac{C_e}{ns} A_m \times 10^3 \quad (25)$$

onde,

$C_e$  = coeficiente de evaporação (mm/mês);

$A_m$  = área correspondente ao volume médio ( $Km^2$ );

$n_s$  = número de segundos do mês (s/mês).

O número de segundos do mês considerado nos cálculos leva em conta o número de dias de cada mês, inclusive verificando se o mês é fevereiro e se o ano é bissexto, não se tratando portanto, de um valor médio constante para todos os meses.

#### **A1.6 - Volume Final da Trajetória de Operação**

Ao considerar-se o resultado da programação dinâmica (forward) empregada neste trabalho, o volume final da trajetória não está fixado. Para efeito de dimensionamento de usinas, pode-se estar comparando resultados energéticos de uma trajetória que se encerra com o reservatório totalmente cheio com os resultados energéticos de uma trajetória de operação que termina com o reservatório totalmente vazio.

Dependendo do período simulado, os efeitos dessas diferenças podem ser sensíveis. Como opção ao analista, foi incluída a possibilidade de se imprimir a melhor trajetória de operação que se encerra num volume dado. Assim, além da estratégia eficiente de operação, pode-se dispor da trajetória que resulta num volume final pré-estabelecido.

#### **A1.7 - Cota de Jusante**

A cota de jusante é determinada através de uma tabela de pares de pontos de vazão defluente e nível de jusante. Os valores intermediários são obtidos por interpolação linear.

## APÊNDICE 2

### Dados característicos do aproveitamento múltiplo Formoso-H

#### A2.1 - Dados do aproveitamento

Queda de referência = 29,7 m

Canal de fuga médio = 484,3 m

Cota do reservatório:    máxima = 516,0 m  
                                 mínima = 511,5 m

Área do espelho d'água:    máxima = 324,1 km<sup>2</sup>  
                                 mínima = 259,2 km<sup>2</sup>

Volume do reservatório:    máximo = 4047 Hm<sup>3</sup>  
                                 mínimo = 2737 Hm<sup>3</sup>

Custo de implantação com 300 MW (ref. dez/1992):  
                                 sem jdc = 659,3 X 10<sup>6</sup> US\$

Taxa efetiva de indisponibilidade forçada: 0,05 pu

Taxa de indisponibilidade programada: 0,03 pu

Tabela Cota X Área X Volume

Cota	Área	Volume
(m)	(km <sup>2</sup> )	(Hm <sup>3</sup> )
511,54	259,22	2737,0
512,75	276,55	3061,1
513,89	293,09	3385,8
514,96	308,81	3707,9
515,99	324,13	4033,8
520,00	385,42	5456,4

Tipo de turbina: Francis

Rendimento do conjunto turbina/gerador e perda hidráulica

Queda		
Bruta	Rend.	Perda
(m)	(pu)	(m)
20,0	0,890	0,5
25,0	0,900	0,8
29,7	0,910	0,9
30,0	0,915	1,5
35,0	0,920	2,0

Nível médio do canal de fuga

Nível d'água de jusante	Vazão defluente
(m)	(m <sup>3</sup> /s)
483,51	0
483,70	100
484,39	500
484,71	700
485,16	1000
485,82	1500
486,41	2000
486,93	2500
487,85	3500
488,63	4500
488,97	5000
489,20	8000

Coefficientes de evaporação média

mês	coeficiente (mm/mês)
jan	12
fev	2
mar	24
abr	45
mai	58
jun	54
jul	50
ago	39
set	46
out	39
nov	35
dez	27

## A2.2 - Demandas de usos múltiplos

Demandas médias mensais de usos múltiplos						
mês	Vazão vertida (m <sup>3</sup> /s)	Vazão p/ abastec. (m <sup>3</sup> /s)	Vazão p/ irrigação (m <sup>3</sup> /s)	Vazão mínima (m <sup>3</sup> /s)	Vazão máxima (m <sup>3</sup> /s)	Volume meta (Hm <sup>3</sup> )
1	8,00	15,00	14,00	90,00	9860,00	3210,20
2	13,00	12,00	17,00	90,00	9860,00	3714,50
3	18,00	10,00	19,00	90,00	9860,00	3725,50
4	8,00	15,00	14,00	90,00	9860,00	3798,80
5	13,00	12,00	17,00	90,00	9860,00	4000,00
6	18,00	10,00	19,00	90,00	9860,00	4047,00
7	8,00	15,00	14,00	90,00	9860,00	4047,00
8	13,00	12,00	17,00	90,00	9860,00	4047,00
9	18,00	10,00	19,00	90,00	9860,00	3950,70
10	8,00	15,00	14,00	90,00	9860,00	3725,50
11	13,00	12,00	17,00	90,00	9860,00	3714,50
12	18,00	10,00	19,00	90,00	9860,00	3210,20

### A2.3 - Dados hidrológicos

#### Vazões afluentes regularizadas médias mensais

ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1951					727	592	565	547	551	540	539	610
1952	717	1591	3520	1451	740	593	572	591	604	557	616	882
1953	616	665	855	733	561	537	524	517	526	532	557	720
1954	603	605	580	533	522	505	505	510	508	507	618	591
1955	588	574	535	657	508	506	508	511	521	407	522	640
1956	720	552	765	562	559	565	531	526	518	522	620	

vazão máxima = 3520 m<sup>3</sup>/s

vazão mínima = 407 m<sup>3</sup>/s

vazão média = 656 m<sup>3</sup>/s

# APÊNDICE 3

## PRINCIPAIS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

fator de atendimento $\lambda = 0\%$						fator de atendimento $\lambda = 70\%$					
P	Vmed	Hliq	Qturb	pot	en	P	Vmed	Hliq	Qturb	pot	en
20	3661.71	28.8	68.09	17.59	17.59	20	3661,71	28.8	68.08	17.61	17.61
50	3666.52	28.8	170.26	44.01	44.01	50	3666.52	28.9	170.26	44.05	44.05
80	3690.60	28.9	272.59	70.62	70.62	80	3690.60	28.9	272.59	70.69	70.69
110	3695.42	28.9	374.51	97.09	97.04	110	3690.60	28.9	374.01	97.16	96.96
140	3661.71	28.8	475.09	123.10	122.71	140	3661.71	28.8	475.09	123.10	122.71
170	3671.34	28.9	554.07	149.77	143.20	170	3647.26	28.8	539.70	149.50	139.21
200	3671.34	28.9	590.01	176.28	152.30	200	3661.71	28.9	565.31	176.30	145.89
230	3671.34	28.9	602.73	202.63	155.26	230	3656.89	28.8	574.95	202.34	147.94
260	3680.97	28.9	606.97	229.24	156.33	260	3676.15	28.9	579.11	229.28	149.16
290	3685.79	28.9	611.49	255.81	157.49	290	3680.97	28.9	583.59	255.81	150.24
320	3685.79	28.9	616.03	282.20	158.52	320	3680.97	28.9	588.07	282.28	151.33
350	3690.60	28.9	620.45	308.77	159.65	350	3685.79	28.9	592.49	308.87	152.47
380	3690.60	28.9	623.93	335.24	160.50	380	3680.97	28.9	596.62	335.05	153.27
410	3690.60	28.9	628.99	361.62	161.68	410	3685.79	28.9	600.61	361.74	154.41
440	3695.42	28.9	631.33	388.41	162.40	440	3676.15	28.9	603.71	387.78	154.81
470	3690.60	28.9	632.90	414.79	162.69	470	3680.97	28.9	605.59	414.58	155.42
500	3685.79	28.9	636.16	440.89	163.21	500	3680.97	28.9	607.39	441.05	155.83
530	3680.97	28.9	639.27	466.95	163.64	530	3676.15	28.9	610.62	467.11	156.30
560	3680.97	28.9	640.85	493.38	164.00	560	3676.15	28.9	612.08	493.55	156.63
590	3680.97	28.9	642.31	519.81	164.33	590	3676.15	28.9	613.54	519.99	156.96
620	3680.97	28.9	643.77	546.24	164.66	620	3676.15	28.9	615.00	546.43	157.30
650	3695.42	28.9	645.60	573.93	165.45	650	3690.60	28.9	616.83	574.12	158.07
680	3695.42	28.9	647.06	600.42	165.78	680	3690.60	28.9	618.29	600.62	158.40
710	3695.42	28.9	648.52	629.90	166.11	710	3690.60	28.9	619.75	627.12	158.73
740	3695.42	28.9	649.97	653.39	166.44	740	3690.60	28.9	621.20	653.62	159.06
770	3695.42	28.9	651.43	679.88	166.77	770	3690.60	28.9	622.66	680.12	159.40
800	3695.42	28.9	652.89	706.37	167.11	800	3690.60	28.9	624.12	706.62	159.73

P = Potência instalada (MW)

Hliq = Queda líquida no aproveitamento (m)

pot = Potência disponível (MW)

Vmed = Volume médio da trajetória de operação (Hm<sup>3</sup>)

Qturb = Vazão turbinada (m<sup>3</sup>/s)

en = Energia gerada (MWmed)

fator de atendimento $\lambda = 75\%$						fator de atendimento $\lambda = 80\%$					
P	Vmed	Hliq	Qturb	pot	en	P	Vmed	Hliq	Qturb	pot	en
20	3661.71	28.9	68.08	17.61	17.61	20	3661,71	28.9	68.08	17.61	17.61
50	3666.52	28.9	170.26	44.05	44.05	50	3666.52	28.9	170.26	44.06	44.06
80	3690.60	28.9	272.59	70.69	70.69	80	3690.60	28.9	272.59	70.70	70.70
110	3690.60	28.9	373.89	97.17	96.93	110	3695.42	28.9	373.95	97.22	97.01
140	3661.71	28.9	475.02	123.35	122.86	140	3661.71	28.9	474.64	123.36	122.77
170	3647.26	28.8	538.46	149.51	138.39	170	3671.34	28.9	537.30	150.08	138.98
200	3661.71	28.9	563.67	176.31	145.47	200	3661.71	28.9	562.00	176.32	145.04
230	3656.89	28.8	572.94	202.36	147.43	230	3656.89	28.8	670.94	202.37	146.92
260	3676.15	28.9	577.10	229.29	148.65	260	3676.15	28.9	575.10	229.31	148.14
290	3680.97	28.9	581.59	255.83	149.73	290	3680.97	28.9	579.58	255.85	149.22
320	3680.97	28.9	586.07	282.30	150.82	320	3680.97	28.9	584.06	282.31	150.31
350	3685.79	28.9	590.49	308.89	151.96	350	3685.79	28.9	588.46	308.91	151.44
380	3680.97	28.9	594.61	335.08	152.76	380	3680.97	28.9	592.61	335.10	152.25
410	3685.79	28.9	598.57	361.77	153.89	410	3685.79	28.9	596.54	361.79	153.37
440	3676.15	28.9	601.67	387.80	154.29	440	3671.34	28.9	599.58	387.61	153.68
470	3680.97	28.9	603.56	414.62	154.90	470	3676.15	28.9	601.47	414.41	154.28
500	3680.97	28.9	605.33	441.08	155.31	500	3676.15	28.9	603.20	440.86	154.68
530	3676.15	28.9	608.56	467.14	155.78	530	3671.34	28.9	606.44	466.91	155.15
560	3676.15	28.9	610.02	493.59	156.11	560	3671.34	28.9	607.90	493.34	155.48
590	3676.15	28.9	611.47	520.03	156.44	590	3671.34	28.9	609.35	519.77	155.81
620	3676.15	28.9	612.93	546.47	156.77	620	3671.34	28.9	610.81	546.20	156.15
650	3690.60	28.9	614.76	547.17	157.54	650	3685.79	28.9	612.64	573.88	156.92
680	3690.60	28.9	616.22	600.67	157.87	680	3685.79	28.9	614.10	600.37	157.25
710	3690.60	28.9	617.68	627.17	158.21	710	3685.79	28.9	615.56	626.86	157.58
740	3690.60	28.9	619.14	653.67	158.54	740	3685.79	28.9	617.02	653.34	157.91
770	3690.60	28.9	620.60	680.17	158.87	770	3685.79	28.9	618.48	679.83	158.24
800	3690.60	28.9	622.06	706.67	159.20	800	3685.79	28.9	619.94	706.34	158.57



fator de atendimento $\lambda = 85\%$						fator de atendimento $\lambda = 90\%$					
P	Vmed.	Hliq	Qturb	pot	en	P	Vmed	Hliq	Qturb	pot	en
20	3661.71	28.9	68.08	17.61	17.61	20	3661,71	28.9	68.08	17.61	17.61
50	3666.52	28.9	170.26	44.06	44.06	50	3666.52	28.9	170.25	44.06	44.06
80	3690.60	28.9	272.59	70.70	70.70	80	3690.60	28.9	272.59	70.70	70.70
110	3685.79	28.9	374.22	97.11	96.99	110	3685.79	28.9	374.13	97.12	96.97
140	3661.71	28.9	474.20	123.37	122.66	140	3666.52	28.9	474.25	123.49	122.75
170	3671.34	28.9	536.06	150.09	138.66	170	3671.34	28.9	534.78	150.10	138.34
200	3656.89	28.9	559.87	176.18	144.40	200	3647.60	28.8	557.49	175.86	143.58
230	3656.89	28.8	568.93	202.38	146.40	230	3656.89	28.8	556.92	202.39	145.89
260	3676.15	28.9	573.09	229.32	147.63	260	3676.15	28.9	571.08	229.33	147.12
290	3680.97	28.9	577.57	255.86	148.71	290	3680.97	28.9	575.56	255.88	148.20
320	3680.97	28.9	582.05	282.33	149.80	320	3680.97	28.9	580.05	282.35	149.28
350	3685.79	28.9	586.42	308.93	150.92	350	3685.79	28.9	584.38	308.95	150.40
380	3680.97	28.9	590.06	335.12	151.74	380	3680.97	28.9	588.56	335.15	151.22
410	3685.79	28.9	594.50	361.82	152.85	410	3685.79	28.9	592.46	361.85	152.34
440	3671.34	28.9	597.54	387.64	153.16	440	3671.34	28.9	595.51	387.67	152.64
470	3676.15	28.9	599.44	414.44	153.76	470	3676.15	28.9	597.40	414.47	153.25
500	3676.15	28.9	601.14	440.89	154.16	500	3676.15	28.9	599.08	440.93	153.63
530	3671.34	28.9	604.37	466.95	154.63	530	3671.34	28.9	602.31	466.98	154.10
560	3671.34	28.9	605.83	493.38	154.96	560	3671.34	28.9	603.77	493.41	154.43
590	3671.34	28.9	607.28	519.81	155.29	590	3671.34	28.9	605.22	519.85	154.76
620	3671.34	28.9	608.73	546.24	155.62	620	3671.34	28.9	606.68	546.28	155.10
650	3685.79	28.9	610.58	573.92	156.39	650	3685.79	28.9	608.52	573.97	155.87
680	3685.79	28.9	612.04	600.41	156.72	680	3685.79	28.9	609.97	600.46	156.20
710	3685.79	28.9	613.50	629.90	157.05	710	3685.79	28.9	611.43	626.95	156.53
740	3685.79	28.9	614.96	653.39	157.39	740	3685.79	28.9	612.89	653.44	156.86
770	3685.79	28.9	616.41	679.88	157.72	770	3685.79	28.9	614.35	679.93	157.19
800	3685.79	28.9	617.87	706.37	158.05	800	3685.79	28.9	615.81	706.42	157.52

fator de atendimento $\lambda = 95\%$						fator de atendimento $\lambda = 100\%$					
P	Vmed.	Hliq	Qturb	pot	en	P	Vmed	Hliq	Qturb	pot	en
20	3661.71	28.9	68.08	17.61	17.61	20	3661.71	28.9	68.08	17.61	17.61
50	3666.52	28.9	170.25	44.06	44.06	50	3666.52	28.9	170.25	44.07	44.07
80	3690.60	28.9	272.59	70.71	70.71	80	3685.79	28.9	272.56	70.68	70.68
110	3680.97	28.9	374.16	97.10	96.96	110	3661.71	28.9	374.48	96.90	96.85
140	3666.52	28.9	473.78	123.50	122.64	140	3676.15	28.9	473.75	123.68	122.71
170	3671.34	28.9	533.51	150.10	138.01	170	3671.34	28.9	532.19	150.11	137.67
200	3647.26	28.8	555.86	175.87	143.16	200	3647.26	28.8	554.22	175.88	142.74
230	3656.89	28.9	564.92	202.40	145.38	230	3666.52	28.9	562.21	202.72	144.87
260	3676.15	28.9	569.08	229.35	146.61	260	3676.15	28.9	567.07	229.36	146.09
290	3680.97	28.9	573.56	255.90	147.69	290	3680.97	28.9	571.55	255.91	147.18
320	3685.79	28.9	577.96	282.49	148.82	320	3685.79	28.9	575.97	282.51	148.31
350	3685.79	28.9	582.34	308.97	149.88	350	3685.79	28.9	580.30	308.99	149.37
380	3680.97	28.9	586.53	335.17	150.70	380	3680.97	28.9	584.50	335.19	150.18
410	3685.79	28.9	590.43	361.87	151.82	410	3685.79	28.9	588.39	361.90	151.30
440	3671.34	28.9	593.47	387.70	152.12	440	3671.34	28.9	591.44	387.73	151.61
470	3676.15	28.9	595.37	414.50	152.73	470	3676.15	28.9	593.34	414.53	152.21
500	3676.15	28.9	597.01	440.96	153.11	500	3676.15	28.9	594.95	440.99	152.58
530	3671.34	28.9	600.24	467.01	153.58	530	3671.34	28.9	598.18	467.05	153.05
560	3671.34	28.9	601.70	493.45	153.91	560	3671.34	28.9	599.64	493.49	153.38
590	3671.34	28.9	603.16	519.88	154.24	590	3671.34	28.9	601.10	519.92	153.72
620	3671.34	28.9	604.62	546.32	154.57	620	3671.34	28.9	602.55	546.36	154.05
650	3685.79	28.9	606.45	574.01	155.34	650	3685.79	28.9	604.39	574.05	154.81
680	3685.79	28.9	607.91	600.50	155.67	680	3685.79	28.9	605.85	600.54	155.15
710	3685.79	28.9	609.37	626.99	156.00	710	3685.79	28.9	607.30	627.04	155.48
740	3685.79	28.9	610.83	653.49	156.34	740	3685.79	28.9	608.76	653.53	155.81
770	3685.79	28.9	612.28	679.98	156.67	770	3685.79	28.9	610.22	680.03	156.14
800	3685.79	28.9	613.74	706.74	157.00	800	3685.79	28.9	611.68	706.52	156.47

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRH (1989). Usos múltiplos da água. Boletim informativo 36. jan/fev 1989

Andrade, Marinho G. (1986). Modelo de otimização para uso múltiplo da água do Rio São Francisco. UNICAMP

Bertsekas D. P. (1987). Dynamic Programming: Deterministic and Stochastic Models. Prentice Hall

Braz, Arthur José Fernandes (1988). Dimensionamento de usinas hidrelétricas com critérios probabilísticos de suprimento de energia. UFMG

Braz, Arthur J. F., Raimundo de P. B. Neto, Osvaldo C. Ramos (1993). Dimensionamento de usinas hidrelétricas com base em critérios probabilísticos. CEMIG/XII SNPTEE

Castor (1991). Makoreh: Simulador de sistemas de reservatórios com múltiplos usos - Manual de referência - CASTOR Consultoria de Recursos Hídricos S/C LTDA.

Chankong, Vira & Haimes, Yacov Y. (1983). Multiobjective decision making - Theory and methodology. North-Holland. New York-Amsterdam-Oxford.

Chaves, José Roberto de Andrade (1992). Estudos energéticos a nível de viabilidade do aproveitamento de Funil - no rio Ribeira de Iguape. CESP/EPG RT-01/1992.

Copel (1990). Proposta de critério provisório para dimensionamento de usinas hidrelétricas.

Eletrobrás (1979). Modelo de simulação a usinas individualizadas: manual de utilização. DENE/DPE

Eletrobrás (1991). Relatório final de 1991 da Equipe de Dimensionamento de Usinas Hidrelétricas. GCPS/SGDUHE. Dez/1991

Eletrosul (1990). Estudo de critério provisório para dimensionamento de usinas hidrelétricas.

Engecorps (1992). Aproveitamento múltiplo do Rio Mogi-Guaçu - PCH Mogi-Guaçu. Projeto básico. Vol 1/2, Texto

Fortunato, L.A.M.; Tristão de A. A. Neto, João C. R. de Albuquerque e Mário V. F. Pereira (1990). Introdução ao Planejamento da expansão e operação de sistemas de produção de Energia Elétrica. Eletrobrás . Editora Universitária/RJ

GCPS - Grupo coordenador do planejamento de sistemas (1982). Critérios de dimensionamento de usinas hidrelétricas. Relatório do grupo de trabalho para estudos de critérios de planejamento energético (GTPE).

Hicks, R. H., C.R. Gagnon, S.L.S. Jacoby e J.S. Kowalik (1974). Large scale, nonlinear optimizations of energy capability for the Pacific Northwest Hydroelectric systems. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol PAS-93, n<sup>o</sup> 5, pp. 1604-1912.

Kelman, Jerson (1989). Dificuldades na implantação de obras de uso múltiplo, ABRH Boletim informativo n<sup>o</sup> 36 - jan/fev 1989

Larry W. Mays & Yeou-Koung Tung (1992). Hydrosystems engineering & management (McGraw Hill, Inc.). cap 7, item 7.6. Singapura.

Loucks, Daniel P., Stedinger, Jerry R. & Haith, Douglas A. (1981). Water Resource Systems Planning and Analysis (cap 4). Prentice-Hall

Luenberger, David G., (1984). Linear and nonlinear programming. Addison-Wesley publishing company.

Ricciulli, Durval Luiz Silva (1990). Planejamento da expansão da geração de sistemas hidrotérmicos de potência, otimizando os usos múltiplos da água dos reservatórios. Unicamp

Sharad, Lele M. (1987). Improved algorithms for reservoir capacity calculation incorporating storage-dependent losses and reliability norm. Water Resources Research, vol 23, nº 10 - outubro de 1987

Siqueira, Geraldo Queiroz (1982a)- Dimensionamento da Potência Instalada em Hidrelétricas, Eletricidade Moderna - Jan/Fev 1982

Siqueira, Geraldo Queiroz (1982b)- Dimensionamento da Potência Instalada em Hidrelétricas, Eletricidade Moderna - Abril de 1982

Yeh, Willian W-G, Becker, Leonard (1982)- Multiobjective Analysis of Multireservoir Operations. Water resources research vol. 18, nº 5 pp 1326-1336