Universidade Estadual de Campinas
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS

UNICAMP

Um Sistema de Apoio a Decisão no Planejamento da Operação Energética de Sistemas de Energia Elétrica

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

por

Cássio Dener Noronha Vinhal
Engenheiro Eletricista - UFU - MG

Campinas, 14 de julho de 1994

Secundino Soares Filho	-	**Orientador**
Boris Garbati Gorenstin	-	**CEPEL**
Mário Jino	-	**FEE/UNICAMP**

V759s
23684/BC

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por CASSIO DENER NORONHA VINHAL e aprovada pela comissão julgadora em 14 / 07 / 95

Leandro Soares T.

Aos meus pais...

*Este trabalho foi realizado com o suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (*FAPESP*) através do Projeto Temático de Equipe: Planejamento da Operação de Sistemas de Energia Elétrica com Predominância de Geração Hidroelétrica.*

Resumo

O presente estudo foi desenvolvido no sentido de se obter um Sistema de Apoio a Decisão (SAD) que integre o trabalho com os diversos modelos do Planejamento Energético da Operação (PEO) a longo e médio prazos, utilizando uma base de dados e interfaces amigáveis.

O elemento central considerado é o acesso efetivo e interativo às informações sejam elas sobre as entidades do sistema modelado ou sobre a utilização dos recursos dentro de uma determinada estratégia de modelagem. Isso garante a obtenção de políticas de decisão efetivas dentro de áreas que envolvam risco e incerteza.

O Sistema de Apoio ao Planejamento Energético (SAPE) foi desenvolvido em Xview e Xlib, *toolkits* para o Sistema X de janelamento. O Sistema X tem se tornado um padrão para gerenciamento de interfaces gráficas em *workstations* que utilizem o sistema operacional Unix. O *look-and-feel* segue o padrão OPENLOOK utilizado no Openwindows das estações Sun Sparc.

O SAPE se encontra hoje em duas versões diferentes apenas quanto ao gerenciamento de dados: uma gerencia arquivos Unix convencionais e outra se utiliza de um Gerenciador de Banco de Dados (Ingres). A diferença de performance entre as duas é visível no tocante a velocidade. A utilização de um Gerenciador de Banco de Dados provoca um *overhead* no processamento de entrada e saída. Entretanto, a consulta às tabelas do modelo de dados (relacional) é facilitada via SQL e, atualizações, deleções e alterações podem ser feitas com segurança.

O SAPE até o momento tem sido testado em frequentes estudos pela equipe do projeto temático FAPESP (90/3611-7) e em cursos de extensão e aperfeiçoamento da Eletrobrás (COSE). O sistema demonstrou ser de grande utilidade pois permite a configuração rápida e confortável de estudos, sob diferentes cenários. A visualização gráfica de resultados e o acesso a diferentes técnicas de modelagem permitem a observação de novas e diferentes nuances relevantes ao processo decisório.

Abstract

The present study has been developed so as to obtain a Decision Support System (DSS) which integrates the work with the various long and medium term Energetic Operation Planning (EOP) models, using a relational database and user friendly interfaces.

The main element considered is the effective and interactive access to the information, be it about the modeled system entities or about the use of the resources within a given modeling strategy. It guarantees the obtainment of effective decision policies within areas that involve uncertainty and risk.

The Energetic Planning Support System (SAPE) was developed in Xview and Xlib, toolkits for the X Window System. The X System has become a pattern for graphic interfaces management in workstations that use the Unix operating system. The "look-and-feel" follows the OPENLOOK pattern used in Sun Openwindows.

Today SAPE can be found in two versions, only different as far as the data management is concerned: one uses conventional Unix files, and the other uses a database management system (Ingres). The difference in performance between the two of them can be easily found: the use of a database management system provokes an overhead in the input and output processing. However, the consultation to tables of the relational data model is made easier via SQL. Updating and deletion can be made securely.

SAPE by now has been tested in frequent studies by the group of the FAPESP's thematic project (90/3611-7) and in extension/upgrading courses (COSE) supported by Eletrobrás. The system has proved to be useful, for it permits the comfortable and fast configuration of studies, under different *scenarios*, hydrologies, etc. The graphic visualization of results and the access to different modeling techniques permit the obtainment of new different and relevant nuances for the decision process.

Conteúdo

RESUMO iii

ABSTRACT iv

CONTEÚDO v

1 Introdução 1

1.1 Sobre o Título 1

1.2 Sistemas de Informação/Planejamento 2

2 Sistemas de Apoio a Decisão 4

2.1 Tomada de Decisão 5

2.1.1 Classificação para Problemas de Decisão 6

2.1.2 A Fase de Modelagem 7

2.1.3 A Fase de Escolha 10

2.2 O Conceito de Sistema de Apoio a Decisão 11

2.3 Os Componentes de um Sistema de Apoio a Decisão 13

2.3.1 Gerenciamento de Dados 13

2.3.2 Gerenciamento de Modelos 15

2.3.3 O Subsistema Gerenciador de Interface/Diálogo 16

2.3.4 O Subsistema Gerenciador de Conhecimento 18

2.4 Ferramentas para o Desenvolvimento de um SAD 18

3 Produção de Energia Elétrica **20**

3.1 Modelamento de um Sistema Hidroelétrico 21

3.2 Modelamento de um Sistema Termoelétrico 26

3.3 Representação das Vazões 30

4 Planejamento Energético e Técnicas de Modelagem **31**

4.1 A Cadeia de Planejamento 32

4.1.1 Planejamento a Longo Prazo 33

4.1.2 Planejamento a Médio Prazo 33

4.1.3 Planejamento a Curto Prazo 34

4.2 Modelando o Problema 35

4.3 Modelos de Otimização 35

4.3.1 **Modelo Equivalente (ME)** 35

4.3.2 POSH 39

4.4 Modelos de Simulação 41

4.5 Varreduras 44

5 Modelagem de Dados **45**

5.1 Os Dados Básicos do Sistema 46

5.2 Os Dados dos Estudos 48

5.3 Conhecimento de Especialistas 49

5.4 O Banco de Dados 49

5.5 O SGBD Ingres 51

6 SAPE: Sistema de Apoio ao Planejamento Energético **54**

6.1 Requisitos Iniciais 55

6.2 O Sistema 56
6.2.1 Gerenciamento de Dados 57
6.2.2 O Gerenciamento de Modelos 58
6.2.3 O Gerenciamento de Interface 58
6.3 Interface Homem-Máquina 60
6.3.1 Frame Principal - Sape 2.0 60
6.3.2 Aproveitamentos 61
6.3.3 Otimização 63
6.3.4 Simulação 67
6.3.5 Gráficos 68
6.3.6 Deletar 70

7 Implementação **72**

7.1 Estrutura de Arquivos para o SAPE 73
7.2 Diagramas Hierárquicos de Funções 73
7.3 Estruturas de Dados 78
7.4 Parâmetros de Implementação 79

8 Conclusão **80**

A Dicionário de Dados **83**

A.0.1 Descrição das Entidades 84

B Formatação dos Arquivos SAPE **93**

B.1 Arquivos de Entrada de Dados 93
B.1.1 Diretório de Dados Principal 93
B.1.2 Diretório de Dados do Usuário 97
B.1.3 Diretório de Resultados dos Modelos 98

BIBLIOGRAFIA 100

Capítulo 1

Introdução

Planejar significa estabelecer metas, políticas e métodos para um sistema econômico e social. Um planejamento eficiente deve se preocupar com o gerenciamento e alocação dos recursos de um sistema bem como com o crescimento do sistema. Um sistema mal gerenciado resulta em desperdício, altos custos e o crescimento desorganizado faz surgir realidades bizarras e danosas para a humanidade: ambientes hostis, clima ruim, poluição, pobreza, marginalização, etc.

O planejamento não visa produzir uma realidade com efeitos sociológicos. É a realidade sociológica quem deve produzir efeitos no planejamento. Felizmente, nos países da Comunidade Européia, Japão e, mais recentemente EUA, tem surgido o conceito de "Planejamento Inteligente". O objetivo é fazer um estudo equilibrado obtendo-se uma utilização mais econômica dos recursos, benefícios sociais, ecológicos e **o encurtamento dos processos de decisão.**

1.1 Sobre o Título

Devido ao grande crescimento e complexidade que os sistemas organizacionais têm adquirido, o planejamento de uma forma geral passou a requerer metodologias e modelos cada vez mais complexos. A grande quantidade de informação envolvida exige a concepção de sistemas computacionais que gerenciem a obtenção de informação com eficiência e qualidade. A informação é o núcleo de todo o processo decisório e os sistemas

desenvolvidos são um reflexo das metodologias a que se propõem fornecer suporte.

Desde a década de 60 o Brasil tem se preocupado com o Planejamento da Operação Energética de Sistemas de Energia Elétrica. A complexidade dos sistemas de transmissão e geração também tem crescido muito, tornando necessário o desenvolvimento de metodologias e ferramentas matemático-computacionais que auxiliem na obtenção de políticas de decisão adequadas.

As pesquisas, até meados da década de 70, se restringiam somente às empresas e centros de pesquisa do setor de energia elétrica. Desde então, algumas universidades como a UNICAMP têm pesquisado e desenvolvido novas metodologias.

O presente trabalho procura mostrar a relação entre Planejamento Energético da Operação Energética de Sistemas de Energia Elétrica e Sistemas de Apoio a Decisão (SAD).

1.2 Sistemas de Informação/Planejamento

No tocante aos processos de decisão no presente trabalho, tentaremos mostrar que a utilização de Sistemas de Apoio a Decisão não só conduz a um encurtamento dos mesmos mas acarreta uma **melhoria na qualidade das decisões**.

O encurtamento dos processos decisórios ocorre devido ao trabalho em um ambiente que proporciona a obtenção e comparação de diversas políticas de decisão, a integração dos modelos e o acesso à informação, que é apresentada de forma clara e eficiente.

Os SAD's são criticados frequentemente no sentido de que "não existe uma teoria" na área. Entretanto, existem estruturas conceituais e modelos mentais utilizados por profissionais da área para orientar suas ações. A crítica torna-se inócua quando se observa os sistemas úteis desenvolvidos com o auxílio de estruturas conceituais. No Capítulo 2 procuraremos mostrar uma estrutura conceitual, bem como uma metodologia para que se classifique e justifique o uso de SAD's.

No Capítulo 3, discute-se a Produção de Energia Elétrica de modo a fonecer subsídios para o desenvolvimento de um Modelo de Dados. Planejamento Energético, bem como as diversas abordagens de modelagem e estudos, são discutidos no Capítulo 4.

O excesso de informação constitui um grande dilema. Muitas vezes o ser humano não pode assimilar inteiramente a inundação de informações que é processada. Uma tarefa importante consiste em separar, dentre as superabundantes possibilidades as mais importantes e então apresentá-las de uma forma mais próxima do usuário.

Duas áreas distintas podem ser então identificadas: uma se preocupa com a coleta, a organização e o gerenciamento da informação (Capítulo 5) e, a outra, com a apresentação da informação, o que é mostrado no Capítulo 6 juntamente com uma visão geral do sistema desenvolvido.

Finalmente, no Capítulo 7, discutimos os aspectos da implementação. Informações suplementares são fornecidas nos Apêndices.

Capítulo 2

Sistemas de Apoio a Decisão

Com o advento do computador e todo o aparato eletrônico dos últimos anos, a humanidade começou a vislumbrar uma nova maneira de viver. Vivemos a era da informação. A troca de informações nunca foi tão eficiente, tanto do ponto de vista da velocidade, quanto da interação com os *veículos* de troca. Segundo Simon [1], nós estamos vivendo a terceira revolução da informação. A primeira coincidiu com a invenção da escrita e a segunda com a invenção da imprensa. A terceira revolução apresenta as seguintes características:

- Inovações tecnológicas e processamento da informação;
- Crescimento acentuado de grupos e organizações em número, tamanho e complexidade;
- Sistemas de processamento da informação que unam fatores humanos aos da máquina.

Acredita-se que as inovações tecnológicas vão mudar a maneira pela qual o planejamento nas organizações é feito. O potencial dessas tecnologias já está causando grande impacto na efetividade da tomada de decisões.

O computador difere dos demais *veículos* pelo fato de transformar a informação, além de armazená-la e exibí-la. Essa propriedade assume um significado especial, quando observamos que o processo de pensar humano envolve a transformação de informação. Como resultado o computador tem se tornado parceiro cada vez mais frequente na tomada de decisão, auxiliando no trabalho com modelos quantitativos e qualitativos.

O apoio a tomada de decisão se tornou uma área multidisciplinar que envolve as áreas de Teoria de Decisão (problemas de cunho gerencial e organizacional), Pesquisa Operacional (modelagem matemática) e Ciência da Computação, entre outras.

Este capítulo objetiva introduzir alguns fundamentos do processo de Tomada de Decisão. Dentro desse processo é proposto um *framework* que permite encontrar o tipo de suporte computacional adequado a um determinado problema. Baseando-se nesse *framework*, conclui-se que a solução SAD/SE (Sistemas de Apoio a Decisão/Sistemas Especialistas) é bastante adequada como suporte a decisão em problemas semi-estruturados e/ou não-estruturados. Finalmente é mostrado e discutido um esboço conceitual bem como ferramentas para desenvolvimento de SAD's.

2.1 Tomada de Decisão

No processo de solução de um problema são seguidos passos sistemáticos:

1. Definição do problema;
2. Classificação do problema em categorias padrão;
3. Construção de um modelo que descreva o problema real;
4. Encontrar as soluções em potencial para o problema modelado e avaliação das mesmas;
5. Escolha de uma solução para o problema;

Esses processos culminam com uma **tomada de decisão.**

Segundo Simon [1] esse processo pode ser resumido em três fases mais amplas: **Inteligência** (1 e 2), **Elaboração** (3 e 4) e **Escolha** (5). Mais tarde anexou-se a fase de **Implementação.**

Na verdade, o processo de modelagem começa na fase de Inteligência mas é na fase de Elaboração que o modelo é efetivamente construído, o que é feito, como será visto a seguir, através de uma simplificação do problema real (abstração). Passa-se então a uma

fase de validação dos resultados do modelo, seguida de uma escolha e implementação da melhor solução.

Esse processo pode ser **Adaptativo**, ou seja, pode ser feita uma avaliação após a implementação das soluções de modo a se determinar desvios. Nesse caso, uma estratégia corretiva pode ser adotada.

2.1.1 Classificação para Problemas de Decisão

Dentro da fase de **Inteligência**, definido o problema, é necessário classificá-lo. Um *framework* clássico, proposto por Gorry e Scott-Morton [3], combina a classificação baseada em grades de tempo proposta por Anthony [2] com uma classificação baseada no grau de estruturação dos problemas de decisão proposta por Simon [1].

Simon classifica os problemas de decisão em dois tipos: **estruturados** e **não-estruturados**.

Em um processo **estruturado** os procedimentos para obtenção da melhor solução (ou a mais razoável) são conhecidos, os objetivos são bem definidos. Os problemas ocorrem de forma rotineira e repetitiva. A construção de modelos de otimização e a utilização de recursos de processamento de dados é facilitada.

Nos processos **não-estruturados**, a solução é obtida na maioria das vezes através da criatividade e pensamento abstrato. Exemplos típicos de problemas não-estruturados são a escolha de novos serviços a serem prestados, nomeação de executivos e escolha de uma nova linha de investimentos e pesquisa.

No caso **semi-estruturado**, tem-se uma combinação das características dos anteriores. Os procedimentos de solução rotineiros e o julgamento pessoal estão envolvidos. A qualidade da decisão é melhorada com a melhoria das informações e o aumento do número de soluções possíveis.

Os problemas do mundo real são por natureza não-estruturados. Porém eles podem ser aproximados (por meio da abstração) em problemas semi-estruturados ou mesmo estruturados, onde podem existir metas conflitantes ou seja, não se pode otimizar uma meta sem prejudicar outras.

A classificação de Anthony se utiliza de uma *divisão em grades de tempo*, para obtenção dos tipos de controle:

O Planejamento Estratégico envolve as políticas de longo termo (cinco anos ou mais). A informação é geralmente agregada e o problema é caracterizado por um alto grau de incerteza com relação ao futuro;

O Planejamento Tático ou Controle Gerencial envolve a utilização eficiente de recursos, o horizonte de tempo é mais curto (6 meses a 1 ano). Existe uma pequena incerteza;

O Controle Operacional envolve uma execução eficiente e efetiva utilizando os recursos da forma prevista pelo Planejamento Tático. Os horizontes de tempo se resumem a dias ou mesmo horas e, o nível de incerteza é baixo. As informações necessitam ser extremamente detalhadas revelando detalhes específicos do problema.

Agora podemos, com base nos ítens discutidos anteriormente classificar o tipo de suporte necessário a um determinado problema.

Observando com atenção a Tabela 2.1 [4] notamos que: a maioria dos problemas de nível operacional são estruturados e, os problemas de planejamento estratégico e tático por sua vez tendem em sua maioria à não-estruturação. Entretanto, mesmo a nível operacional existem tarefas altamente não-estruturadas e difíceis de programar.

Notamos também que os SAD's são propostos como suporte a solução de problemas semi-estruturados ou não-estruturados em todos os níveis da cadeia de planejamento, ou seja, operacional, gerencial e estratégico, sempre que o julgamento humano se torne necessário.

2.1.2 A Fase de Modelagem

Um modelo é uma representação simplificada ou abstração da realidade. Ele é simplificado porque geralmente a realidade é muito complexa para ser copiada ou porque certos aspectos são irrelevantes para um problema específico.

Os modelos, de acordo com o grau de abstração, podem ser classificados em:

	Operacional	**Gerencial**	**Estratégico**	**Suporte**
Estruturado	1 Contas a receber, Ordens de compra	2 Análise de orçamento, Previsões a curto prazo	3 Gerenciamento financeiro, Sistema de distribuição	Modelos Matemáticos, Processamento de transacoes
Semi-Estruturado	4 Escalona-mento de produção, controle de inventário	5 Análise de crédito, Layout de Fábrica	6 Constr. de nova fábrica, Planejto. de novo produto	SAD
Não-Estruturado	7 Compra de Software	8 Recrutamento e seleção, Compra de Hardware	9 Pesquisa e Tecnologia, Planejamento social	SAD, SE, Redes Neuronais

Tabela 2.1: Tipo Decisão X Tipo de Controle = Suporte Necessário

- **Modelos de Escala**: É uma réplica física do sistema e o menos abstrato. Pode ser em duas dimensões (fotografias) ou três dimensões (aeromodelos, automodelos, etc).
- **Modelos Análogicos**: Um modelo análogico não se parece com o sistema físico, mas se comporta como ele. É mais abstrato que os modelos de escala e é uma representação simbólica da realidade. Pode ser um diagrama de fluxo, um mapa geográfico, um termômetro, etc.
- **Modelos Simbólicos**: Quando a realidade é representada de forma simbólica ou através de relacionamentos qualitativos (modelos de lógica simbólica).
- **Modelos Quantitativos**: A complexidade muitas vezes não pode ser representada por modelos de escala ou análogos, ou tal representação pode ser cara. Modelos mais abstratos, podem então ser feitos com o uso da matemática. Estes modelos são quantitativos (modelos de otimização e simuladores).

Geralmente os modelos, sejam eles quantitativos ou qualitativos, são compostos de três componentes básicos: **variáveis de decisão, variáveis não-controláveis** e **variáveis de resultado.**

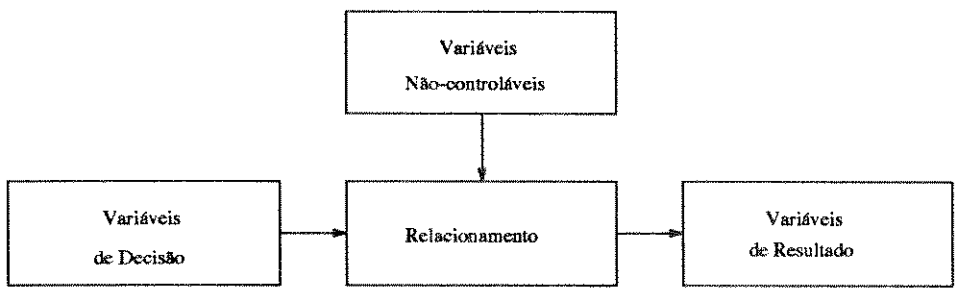

Figura 2.1: Estrutura Geral de um Modelo;

Os componentes são relacionados matematicamente ou, em modelos não-quantitativos, de forma simbólica e qualitativa.

Variáveis de Resultado: Refletem o grau de efetividade do sistema, ou seja, quão bem o sistema se atém a suas metas. São variáveis dependentes (custos de geração térmica, por exemplo).

Variáveis de Decisão: Descrevem os cursos alternativos de ação. São variáveis independentes e os valores delas são determinados por um tomador de decisão. O objetivo

de um SAD é determinar o melhor curso de ação, ou o mais razoável possível. Em problemas semi-estruturados e não-estruturados, o processo de decisão é mais difícil de se automatizar pois o número de variáveis de decisão tende a aumentar consideravelmente.

Variáveis Não-controláveis: Em toda situação de decisão existem fatores que afetam as variáveis de resultado mas *não são controláveis* pelo tomador de decisão. São parâmetros fixos ou variáveis como demandas, vazões, limites operacionais, etc. Eles são incontroláveis pois seus valores emanam do ambiente em cujo contexto está inserido o sistema modelado.

A teoria clássica de tomada de decisão também assume que as decisões são tomadas sob três condições: **certeza**, **incerteza** e **risco**. Entre os limites de certeza e incerteza estão as condições de risco, onde as variáveis de ambiente do sistema são estimadas pela probabilidade de ocorrência. Muitas decisões são tomadas sob risco. Nessa condição a experiência e a sensibilidade do problema são muito importantes.

Em situações de risco, **modelos de previsão** geralmente são utilizados para determinação de variáveis em instantes futuros. Exemplos conhecidos são os modelos de séries temporais onde situações que ocorreram no passado servem de base para se fazer uma previsão para o futuro.

2.1.3 A Fase de Escolha

A avaliação das alternativas vai depender do critério que se deseja utilizar. Para muitos problemas estruturados o processo para se chegar a melhor solução é bem conhecido e modelável matematicamente através de modelos Normativos ou Descritivos.

Modelos Normativos: a alternativa escolhida é a melhor. É um processo conhecido como otimização. É necessário provar se a solução é realmente a melhor ou o quão ela é razoável (subotimalidade). Existem várias abordagens: Programação Linear, Não Linear, Dinâmica, Modelos de Rede, etc.

Modelos Descritivos: a alternativa escolhida é sempre razoável e mede a performance do sistema para um dado conjunto de alternativas. São investigadas as consequências de vários cursos de ação sob diferentes cenários e processos. Também existem

várias abordagens: Simuladores, Análise Markoviana, etc.

A Busca da Solução

Para que uma escolha seja feita é necessário uma **busca**. São estabelecidas metas que são procuradas em um espaço de soluções. Técnicas analíticas e algoritmos podem ser utilizados.

As técnicas **Analíticas**, normalmente utilizadas por modelos normativos, visam encontrar uma solução ótima através do uso de fórmulas matemáticas, principalmente em problemas bem estruturados. Em problemas mais complexos, alguma heurística pode ser utilizada conjuntamente, de modo a evitar desperdiício de tempo e esforço computacional.

Algoritmos podem ser utilizados pelas técnicas analíticas de modo a aumentar a eficiência. Soluções são geradas e testadas, até que não possam mais ser melhoradas.

Uma **busca cega** pode ser feita através de **enumeração completa**, onde todas as alternativas são consideradas, ou **incompleta**, onde ela é feita até que uma solução razoável seja encontrada. Buscas cegas não são aconselháveis em problemas complexos.

Em uma **busca heurística**, informações especiais são utilizadas para conduzir a busca (informação heurística). Regras de decisão são utilizadas e levantadas através de estudos rigorosos do problema muitas vezes através de experimentação.

Segundo Simon [1], a maioria das decisões humanas são apenas satisfatórias ou *boas o bastante*. A causa disso é que existe o chamado **limite de racionalização**. Nunca uma abstração corresponderá a uma realidade. Na verdade, a melhor solução não existe. Ou melhor dizendo, ela existe mas, dentro de um espaço de soluções onde a representação utilizada é sempre limitada em comparação com a realidade inatingível.

2.2 O Conceito de Sistema de Apoio a Decisão

Os conceitos de SAD começaram a ser trabalhados a partir de 1970. As definições foram se modificando com o passar do tempo e com os novos conceitos e técnicas. Modernamente uma definição prática seria, segundo Turban [4]:

> *" Um SAD é um sistema computacional interativo, flexível e adaptável, especialmente desenvolvido para auxiliar na solução de um problema particular de planejamento e melhorar o processo de tomada de decisão. São utilizados Gerenciadores de Bancos de Dados, Gerenciadores de Modelos e interfaces amigáveis de modo a provocar " insights " no tomador de decisões. Uma base de conhecimento também pode ser incluída. "*

Não existe um consenso do que seria um SAD. Entretanto, concorda-se com um conjunto de características ideais tais como:

1. um SAD deve servir de apoio ao processo decisório principalmente em processos semi-estruturados e não-estruturados, onde são casados o julgamento humano com as informações computacionais provenientes dos modelos (o julgamento humano nunca é substituído);
2. o suporte deve ser estendido a todos os níveis da cadeia de planejamento, ajudando na integração entre os níveis;
3. o suporte deve ser estendido tanto a indivíduos (decisão independente) quanto a grupos (decisão interdependente). Muitos problemas organizacionais envolvem decisões em grupo;
4. um SAD deve englobar todos os níveis do processo decisório, ou seja, análise do problema, modelagem, escolha e implementação;
5. um SAD deve suportar vários tipos de processos de tomada de decisão e estilos;
6. um SAD deve ser adaptativo e suportar *feedback*;
7. um SAD deve ser fácil de manipular (flexibilidade conversacional);
8. um SAD deve visar a efetividade na tomada de decisão e não a eficiência;
9. o tomador de decisão deve aprender com o uso do SAD, e esse aprendizado deve gerar novas demandas com relação ao seu uso (adaptabilidade);
10. um SAD deve ser fácil de construir e de fácil manutenção;
11. um SAD avançado é equipado com uma *base de conhecimento*;

2.3 Os Componentes de um Sistema de Apoio a Decisão

Um SAD, geralmente é composto dos seguintes elementos:

1. **Gerenciamento de Dados.** Os dados relevantes ao problema são modelados, extraídos, armazenados e gerenciados (em um banco de dados) através de um Gerenciador de Banco de Dados.
2. **Gerenciamento de Modelos.** Modelos quantitativos e qualitativos são armazenados (em um banco de modelos) e gerenciados por um Gerenciador de Modelos.
3. **Gerenciamento de Interface.** O usuário interage com o SAD utilizando linguagem natural ou visual através de um Gerenciador de Interface.
4. **Gerenciamento de Conhecimento.** O conhecimento, necessário à construção e entendimento dos modelos e à interpretação dos resultados, é armazenado e gerenciado.

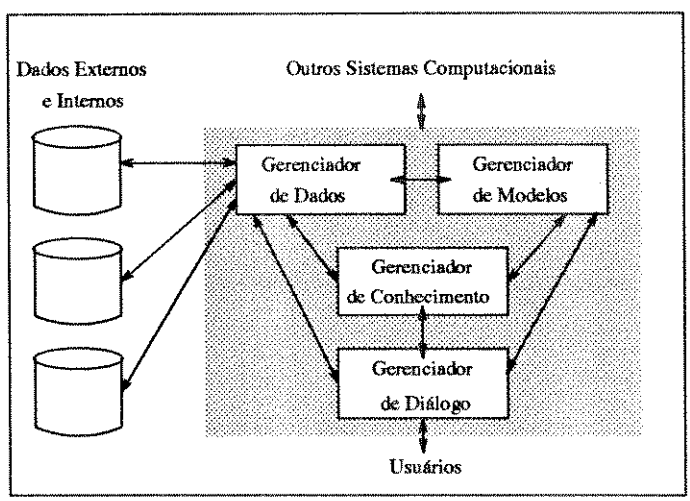

Figura 2.2: Estrutura Conceitual de um SAD (Turban [6]);

2.3.1 Gerenciamento de Dados

O Subsistema Gerenciador de Dados (SGD) é composto dos seguintes elementos:

- Banco de Dados do SAD;
- Gerenciador de Banco de Dados;
- Diretório de Dados;
- Facilidades de Consulta;

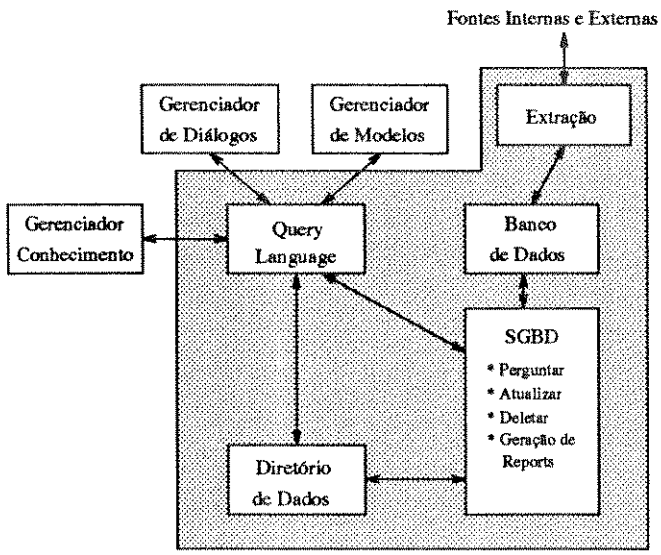

Figura 2.3: Estrutura Conceitual do SGD (Turban [6]);

Um **banco de dados** é uma coleção de dados interrelacionados e organizados de tal forma que correspondam a estrutura de uma organização e possam ser usados por mais de uma pessoa e mais de uma aplicação. A organização é feita em arquivos que, fisicamente são armazenados em um dispositivo de memória secundária, como uma fita ou disco rígido.

Esses dados devem ser coletados de fontes internas e/ou externas e, depois extraídos, armazenados e controlados, de forma a garantir a sua segurança, integridade e consistência por um **Sistema Gerenciador de Banco de Dados**, SGBD.

Um **Diretório de Dados** deve fornecer informações sobre os dados armazenados, definições e condições de armazenamento.

As **Facilidades de Consulta** possuem como requisito mínimo uma SQL (System Query Language) para manipulação dos dados, ou seja, inserções, atualizações e deleções (segundo a forma de organização).

2.3.2 Gerenciamento de Modelos

O Subsistema Gerenciador de Modelos (SGM) de um SAD deve manipular modelos da mesma forma que um SGD manipula dados. É a área mais promissora em termos de futuras pesquisas, uma vez que não existem pacotes no mercado que atendam todos os requisitos mencionados a seguir. Ele é composto dos seguintes elementos:

- Banco de Modelos;
- Gerenciador de Banco de Modelos;
- Linguagem de Modelagem;
- Diretório de Modelos;

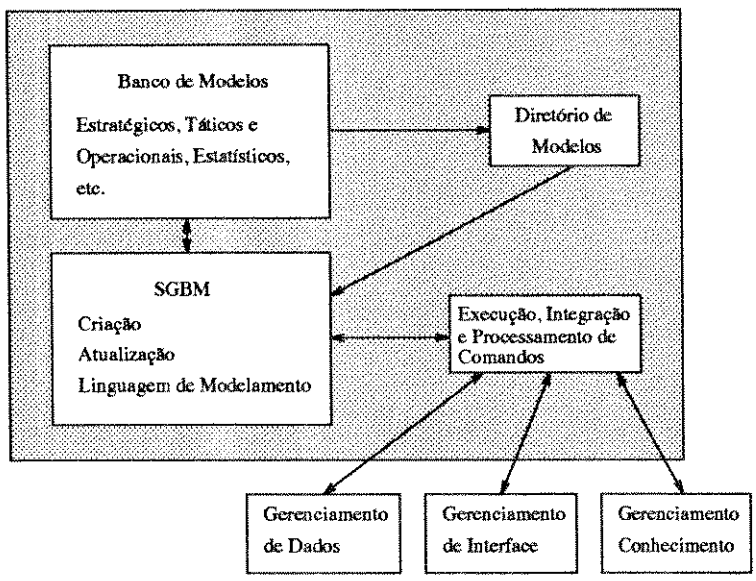

Figura 2.4: Estrutura Conceitual de um SGM (Turban [6]);

O banco de modelos contém modelos quantitativos ou qualitativos, organizados do mesmo modo que os dados podem ser organizados em um Banco de Dados.

As funções do **Sistema Gerenciador de Banco de Modelos**, SGBM, são parecidas com aquelas de um SGBD, ou seja, armazenar modelos e controlar aspectos de segurança e integridade. Uma **Linguagem de Manipulação** (similar a uma SQL de

um SGBD) deve ser provida com recursos para armazenar, modificar, executar e integrar modelos.

Em alguns SAD's uma **Linguagem de Modelagem** de alto nível possui recursos para a construção de novos modelos. Um bom exemplo de linguagem desse tipo é aquela utilizada pelo Matlab [30].

O Diretório de Modelos fornece um catálogo de todos os modelos, definições e condições de armazenamento.

Uma característica interessante de um SGM é que um determinado decisor pode ver um modelo como simplesmente um nome ou um gráfico. O modelador por sua vez pode ver o modelo como um grafo ou um conjunto de funções (objetivos e restrições).

2.3.3 O Subsistema Gerenciador de Interface/Diálogo

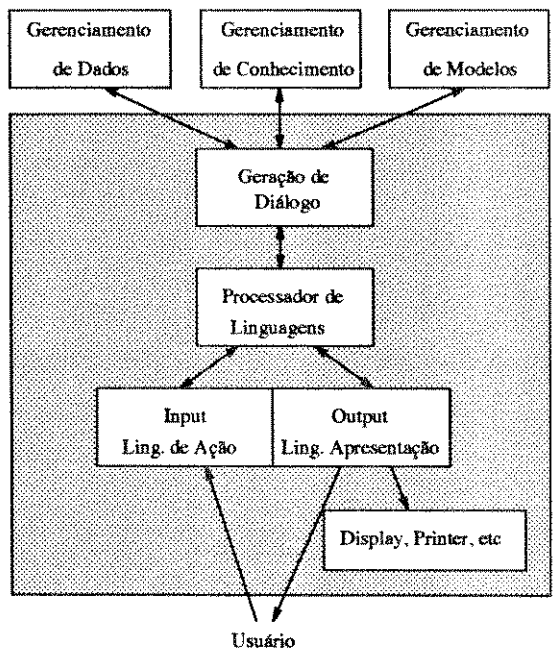

Figura 2.5: Estrutura Conceitual de um Sist. Gerenc. Diálogo (Turban [6]);

O Subsistema Gerenciador de Interface (SGI) é um conjunto *software/hardware* que fornece a interface com o SAD. O termo **interface com o usuário** cobre todos os

aspectos de comunicação entre o SAD e o usuário. A interface com o usuário é o componente mais importante por que a maior parte da força, flexibilidade e amigabilidade de um SAD é derivada desse componente. Um interface inconveniente pode tornar o trabalho dos planejadores com computadores e análise quantitativa, muitas vezes cansativo.

Segundo Turban [4], a qualidade de uma interface depende daquilo que o usuário vê, daquilo que ele precisa saber para entender o que vê e de que ações ele precisa tomar para obter os resultados de que necessita.

O SGI possui um software chamado Sistema Gerenciador e Gerador de Interface (SGGI). O SGGI é composto de muitos programas.

O processo de diálogo para um SAD é mostrado esquematicamente na figura 2.5. O usuário interage com um computador através de dispositivos como teclado e mouse dentro da filosofia de uma **linguagem de ação** (menus, botões, comandos) processada pelo SGGI. Em sistemas avançados esse componente de diálogo inclui um processador de linguagem natural. O SGGI permite ao usuário interagir com o SGD (trabalhando com dados) e o SGM (trabalhando com modelos).

Como a comunicação não é unilateral, o sistema reage à ação do usuário, devolvendo informação sobre os resultados obtidos. Isso é feito através do *display*, da impressora e geração de áudio (mensagens, gráficos, relatórios, sons), dentro da filosofia de uma determinada **linguagem de apresentação**. Sistemas avançados incluem geração de voz.

As linguagens de ação e apresentação podem ser desenvolvidas dentro de um *estilo de diálogo*. Estilos famosos são o OPEN LOOK (utilizado pelo Openwindows das estações Sun), o Motif (utilizado por vários produtos como o Word Perfect e Windows4GL), o utilizado pelos computadores Macintosh (Apple) e o utilizado pelo Windows da Microsoft. O estilo deve agregar os elementos já mencionados de forma elegante, sem exageros e sem deficiências.

Outro conceito que deve ser comentado agora são as GUI (Graphical User Interface). São sistemas construídos dentro dos estilos de diálogo já comentados (o OpenWindows, o Windows e o DOS 6.0). O usuário tem controle direto dos objetos visíveis (como ícones e botões) e ações substituem comandos de sintaxe complexa. Os usuários apenas tocam o *mouse* ou preenchem áreas específicas na tela. As GUI's tendem a ser o padrão de

interface dos anos 90.

Exageros também devem ser eliminados quanto ao volume de dados a ser analisado. Isso pode ser feito resumindo-os através de estatísticas e médias, apresentadas via tabelas, gráficos e relatórios ou, eliminando simplesmente aqueles pouco interessantes.

2.3.4 O Subsistema Gerenciador de Conhecimento

Muitos problemas não-estruturados e semi-estruturados são tão complexos que requerem expecialistas para a sua solução em adição às facilidades oferecidas pelos SAD's. Tal especialista pode ser provido através de um Sistema Especialista (SE). Portanto, os SAD's mais avançados são equipados com um componente que podemos chamar de Gerenciador de Conhecimento. Tal componente pode prover o especialista e/ou prover conhecimento que melhore a operação dos componentes comuns de um SAD.

O componente de gerenciamento de conhecimento pode ser composto por um ou mais sistemas especialistas. Como no gerenciamento de dados e modelos, o Gerenciamento de Conhecimento provê a necessária execução e integração dos sistemas especialistas.

Sistemas de Apoio a Decisão que incluem tal componente são comumente chamados de inteligentes. São os SAD/SE's ou SAD's baseados em conhecimento.

2.4 Ferramentas para o Desenvolvimento de um SAD

Feita a classificação do problema e obtido o tipo de suporte necessário, fazemos uma análise da tecnologia aplicada ao desenvolvimento de SAD. Existem cinco estratégias para desenvolvimento:

1. **Uso de Linguagem de Programação de uso comum: C, Pascal, etc.** Atualmente é muito pouco usada, devido à complexidade dos novos sistemas;
2. **Uso de Linguagem de Quarta Geração.** Estratégia muito utilizada atualmente. Essas linguagens podem aumentar a produtividade de uma magnitude de 10 para 1 em relação às linguagens convencionais [4];

3. **Uso de um Gerador de SAD.** Geralmente é um pacote que inclui várias ferramentas, como um gerador de aplicação. Essas ferramentas são acopladas a linguagens de quarta geração. Os geradores aumentam a performance mas diminuem a flexibilidade;
4. **Uso de Gerador de SAD para um domínio específico.** São iguais aos geradores comuns mas direcionados a domínios específicos como áreas financeiras ou científicas;
5. **Uso de metodologia CASE.**

Aconselha-se o uso de geradores de SAD pois os SAD's podem ser constantemente desenvolvidos e modificados com a cooperação do usuário e sem grande demanda de tempo e esforço. A natureza dos SAD's requer uma abordagem diferente da tradicional pois esta é ineficiente uma vez que o sistema é adaptativo. Além disso, o *feedback* usuário/projetistas deve ser rápido a fim de que o desenvolvimento seja realizado apropriadamente.

Capítulo 3

Produção de Energia Elétrica

A energia elétrica é obtida a partir da transformação de outras formas de energia. Os dois tipos principais de usinas para produção de energia elétrica são as hidroelétricas e termoelétricas (Figura 3.1). Um sistema hidrotérmico de geração é composto pelos dois tipos de usinas. A energia produzida é fornecida a uma rede de transmissão que deve atender a centros de carga.

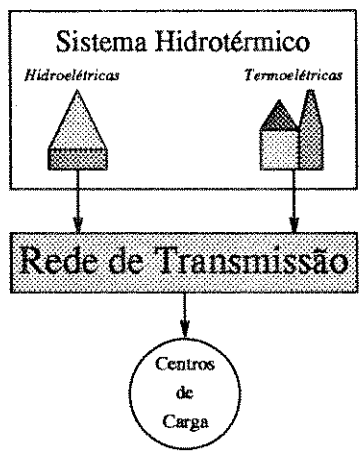

Figura 3.1: Esquema de um sistema hidrotérmico

Tentaremos mostrar aqui representações para os dois tipos de usinas. Procuraremos dar ênfase às hidroelétricas uma vez que o sistema brasileiro é predominantemente

hidroelétrico. A representação das vazões afluentes também é discutida. As representações serão úteis para se conceber o modelo de dados, discutido em outro capítulo.

3.1 Modelamento de um Sistema Hidroelétrico

As hidroelétricas podem estar interconectadas ou isoladas. Se tomarmos duas usinas (**Emborcação** e **Itumbiara** por exemplo) em uma cascata (Figura 3.2), e considerarmos o sentido em que flui o rio, dizemos que Emborcação está a "montante" de Itumbiara e esta, a "jusante" daquela.

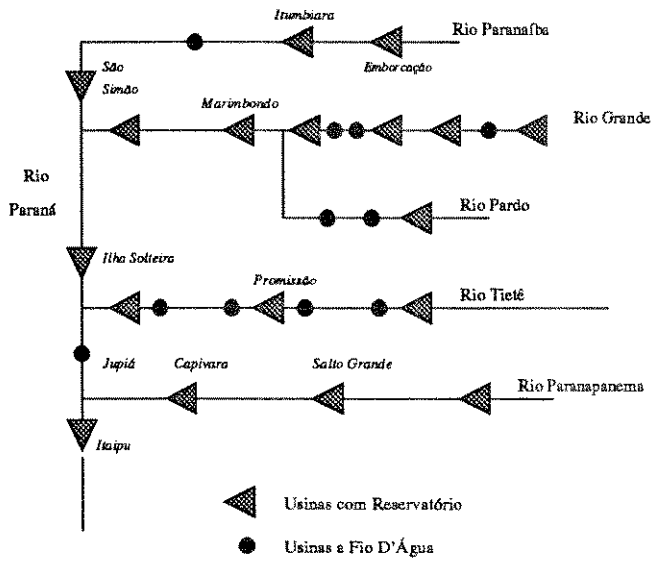

Figura 3.2: Sistema Sudeste

Existem usinas de represamento, de desvio ou de derivação. Uma **usina** ou **aproveitamento** hidroelétrico de represamento, conforme esquema da figura 3.3, é composta por:

- uma barragem que represa a água formando o reservatório;
- condutos forçados que levam a água do reservatório à casa de força;
- uma casa de força, onde estão instalados os conjuntos turbina-gerador;

- um vertedouro, por onde a água é liberada sem passar pelas turbinas;
- um canal de fuga, que leva a água das turbinas para o curso natural do rio.

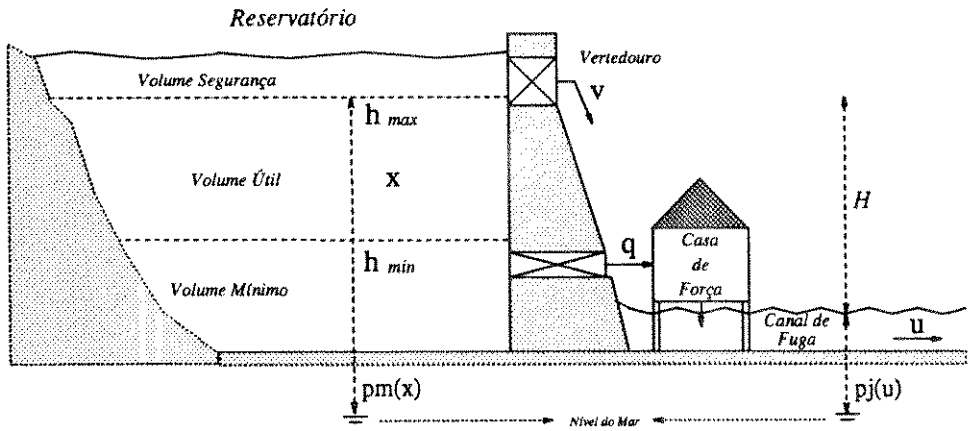

Figura 3.3: Esquema de uma usina hidroelétrica com represamento.

As variáveis representativas básicas são:

- $x \rightarrow$ volume do reservatório;
- $u \rightarrow$ defluência;
- $q \rightarrow$ turbinagem;
- $v \rightarrow$ vertimento;
- $pm(x) \rightarrow$ nível do reservatório;
- $pj(u) \rightarrow$ nível do canal de fuga;
- $H \rightarrow$ altura de queda.

A variável x representa o volume de água armazenado no reservatório. Os reservatórios, conforme sua capacidade de regularização, são classificados como de acumulação ou de compensação. Os reservatórios de acumulação têm grande capacidade de armazenamento e são responsáveis pela regulação da vazão dos rios. Os de compensação têm pequena capacidade de armazenamento permitindo pouca regulação. As usinas com reservatório de

acumulação são denominadas **usinas de reservatório**. Aquelas com reservatório de compensação são denominadas **usinas a fio d'água**. A produção das usinas a fio d'água é inconstante pois, depende da oscilação das vazões naturais do rio.

Quando nos referimos ao volume x de um reservatório estamos nos referindo ao seu **volume útil**, ou seja, o volume que representa a diferença entre os volumes **máximo** e **mínimo** do reservatório. O **volume máximo** é aquele definido pela **altura máxima normal**, ou seja, aquela a a partir da qual é armazenado um **volume de segurança** necessário ao controle de cheias. O **volume mínimo** ou morto é aquele definido pela **altura mínima operativa**, necessária ao funcionamento das turbinas e definida durante o projeto da usina.

Uma usina pode possuir uma ou mais unidades de geração ou turbinas. Cada unidade é caracterizada por uma **potência efetiva**, um **engolimento efetivo** e uma **queda efetiva**.

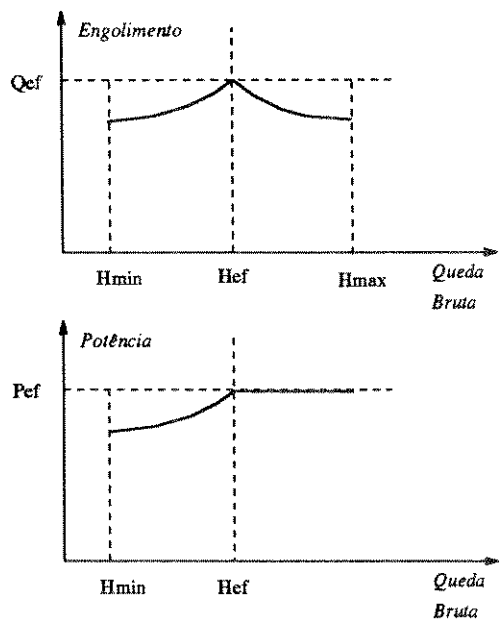

Figura 3.4: Curva Potência X Queda Bruta e Engolimento X Queda Bruta

Chamamos **potência efetiva** ao maior valor de potência ativa que uma unidade é capaz de gerar. **Queda efetiva** é o menor valor de queda bruta para o qual a unidade

é capaz de gerar a potência efetiva. **Engolimento efetivo** é aquele sob o qual a unidade produz a potência efetiva sob queda efetiva.

A turbinagem q representa a vazão que passa pelas turbinas. Ela tem como limite superior o **engolimento máximo** da usina q^{max}, que nesse trabalho é considerado constante e igual ao somatório do engolimento efetivo das unidades.

De acordo com a racionalidade de uma operação econômica, somente quando a defluência, vazão total liberada, for maior que o engolimento máximo, uma usina deve verter, ou seja, liberar água sem produzir energia. Desta forma, a defluência u e a turbinagem q podem ser representadas pelas equações 3.1 e 3.2, respectivamente:

$$u = q + v \tag{3.1}$$

$$q = \min\{u, q^{max}\} \tag{3.2}$$

Uma **defluência mínima** u^{min}, pode ser definida de modo a a garantir a operação da usina, ou devido a outros objetivos na operação do reservatório. No presente trabalho utilizamos a vazão mínima registrada no histórico de vazões.

As funções que fornecem o nível do reservatório e o nível do canal de fuga (**cota de montante** $pm(x)$ e **cota de jusante** $pj(u)$, respectivamente) são representadas por polinômios de até quarta ordem. O polinômio que representa a cota de montante é denominado **polinômio cotaXvolume**, enquanto o que representa a cota de jusante é denominado **polinômio cotaXdefluência**.

Em cascatas com mais de um reservatório, pode ocorrer, devido à proximidade, afogamento do canal de fuga. Na figura 3.5, a **Usina1** possui seu canal de fuga afogado pelo reservatório da **Usina2** e diz-se que ela está **afogada**.

De modo a representar o nível do canal de fuga das usinas com afogamento, para cada usina afogada existe mais de um polinômio cotaXdefluência, de acordo com a cota do reservatório que afoga o seu canal de fuga.

A altura de queda Hq dada pela equação 3.3 é a diferença de cotas a montante e a jusante da usina:

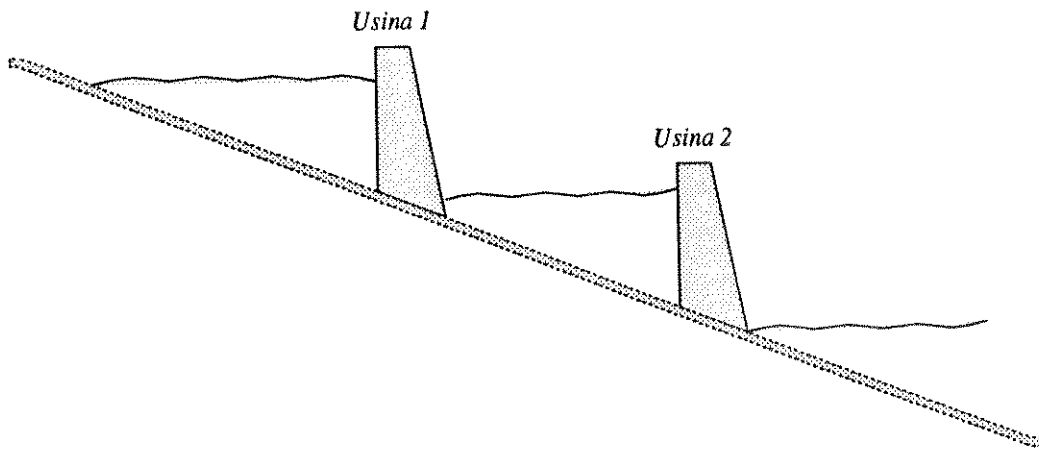

Figura 3.5: Afogamento do canal de fuga.

$$Hq = pm(x) - pj(u) \tag{3.3}$$

A função de geração p(.) das usinas, isto é, a produção de energia elétrica, é diretamente proporcional ao produto da altura de queda H pela turbinagem q:

$$\mathrm{p}(.) \propto H\ q$$

Através das equações 3.2 e 3.3, temos:

$$\mathrm{p}(.) \propto (pm(x) - pj(u)) \min\{u, q^{max}\} \tag{3.4}$$

A relação de proporcionalidade é então dada por uma **constante** k que inclui o rendimento turbina-gerador, a aceleração da gravidade, a densidade da água e fatores de conversão, e acrescentando a **perda de carga** nas tubulações através de uma função linear em relação a turbinagem com inclinação dada por pc, obtemos:

$$\mathrm{p}(x,u) = k(pm(x) - pj(u) - pc)\min\{u, q^{max}\} \tag{3.5}$$

onde, o termo $k(pm(x) - pj(u) - pc)$ é chamado produtividade da usina.

Esta função, observe o gráfico da figura 3.6, representa a geração de uma usina hidroelétrica e possui algumas características interessantes, e importantes para a análise de otimização:

- com o aumento da turbinagem u, para $u < q^{max}$ obtemos uma produção também crescente;
- com o aumento da turbinagem u, para $u > q^{max}$, a influência do vertimento no canal de fuga pode ou não provocar perda de altura de queda e, consequentemente a produção se mantém constante ou decresce;
- a função é não diferenciável no ponto $u = q^{max}$ (limite de turbinagem);
- a produtividade das usinas aumenta com o volume armazenado no reservatório (aumenta a queda).

Para estudos de longo e médio prazos, o rendimento turbina-gerador é assumido constante e igual a um valor médio. Contudo no curto prazo é necessário uma representação mais detalhada da turbina.

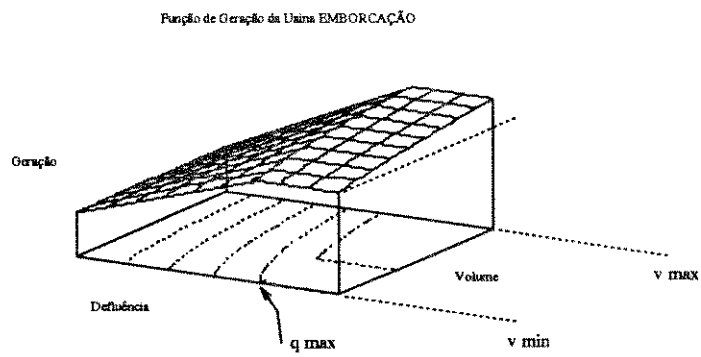

Figura 3.6: Gráfico da função de geração de uma usina hidroelétrica

3.2 Modelamento de um Sistema Termoelétrico

As unidades termoelétricas geralmente se utilizam da queima de matéria-prima para a obtenção do vapor usado para girar a turbina (Figura 3.7). Elas podem ser divididas

em convencionais e nucleares. As convencionais utilizam combustíveis fósseis como carvão, óleo combustível, gás natural, etc. As nucleares utilizam combustíveis físseis como urânio natural e enriquecido.

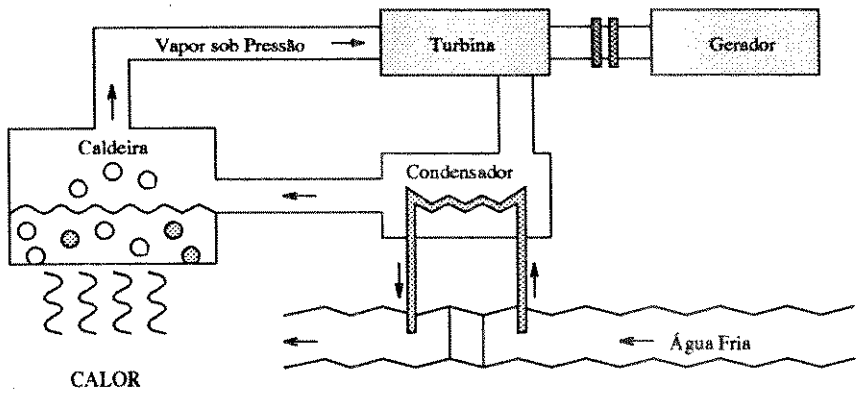

Figura 3.7: Esquema simplificado de uma termoelétrica

Qualquer que seja a termoelétrica, entretanto, sua representação nos estudos de planejamento é feita através de suas características físicas e restrições operativas, tais como potência máxima, combustível usado, consumo específico, e nível mínimo operativo.

O custo de geração das usinas termoelétricas é uma função convexa e crescente, geralmente aproximada por polinômios de segunda ordem, para cada térmica i:

$$c_i = a_i + b_i g_i + c_i {g_i}^2 \tag{3.6}$$

onde: ${g_i}^{min} <= g_i <= {g_i}^{max}$.

A curva de custo mínimo de operação de um sistema termoelétrico com N usinas e mercado D é convexa, crescente e obtida pela resolução de um problema de Despacho Econômico Termoelético [22]. Considerando-se que o parque termoelétrico tem uma capacidade máxima de geração dada por $\overline{G}$, pode-se acrescentar um custo de déficit dado por $\Psi(d > \overline{G})$ à curva de custo de atendimento do mercado (figura 3.8).

A variação do custo com a demanda ($\frac{d\Psi}{dd}$), representa o custo marginal de operação do parque termoelétrico. Esta função é crescente e pode ser dividida por classes

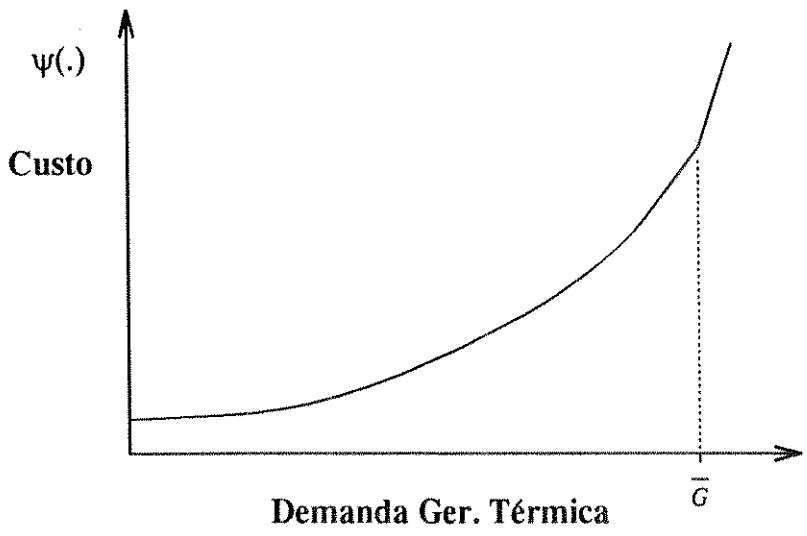

Figura 3.8: Curva de Custo Mínimo de Operação de um Sistema Termoelétrico.

térmicas. Na figura 3.9 é mostrado um exemplo de curva de custo margianal para um parque termoelétrico.

No sistema brasileiro, o despacho termoelétrico é feito baseado na ordenação crescente do consumo específico de cada classe térmica (figura 3.10), que representa o consumo médio de combustível por MW gerado.

Como o modelo de sistemas hidrotérmicos considera o custo de operação sendo o custo da **complementação não hidráulica** [1] para atendimento de um mercado D, podemos representá-lo pela função f(.):

$$\mathrm{f}(H) = \Psi(D - H) \tag{3.7}$$

onde H é a energia gerada por todas as usinas hidroelétricas do sistema, assim $(D - H)$ é a complementação não hidráulica para atendimento do mercado D.

Desta forma o problema do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos se torna exclusivamente hidroelétrico. Por isso, a importância do levantamento da curva de custo do parque termoelétrico no planejamento da operação destes sistemas.

[1] A complementação não hidráulica representa a geração térmica, a importação e o déficit.

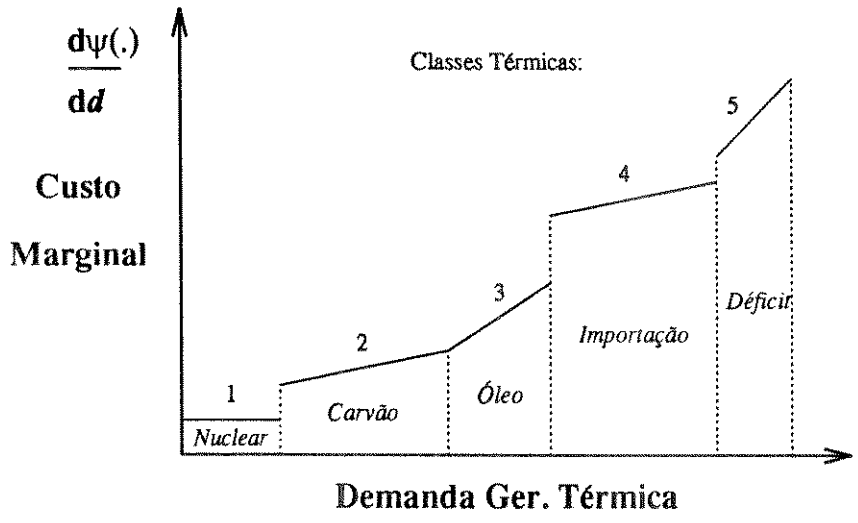

Figura 3.9: Curva de Custo Marginal de Operação de um Parque Termoelétrico.

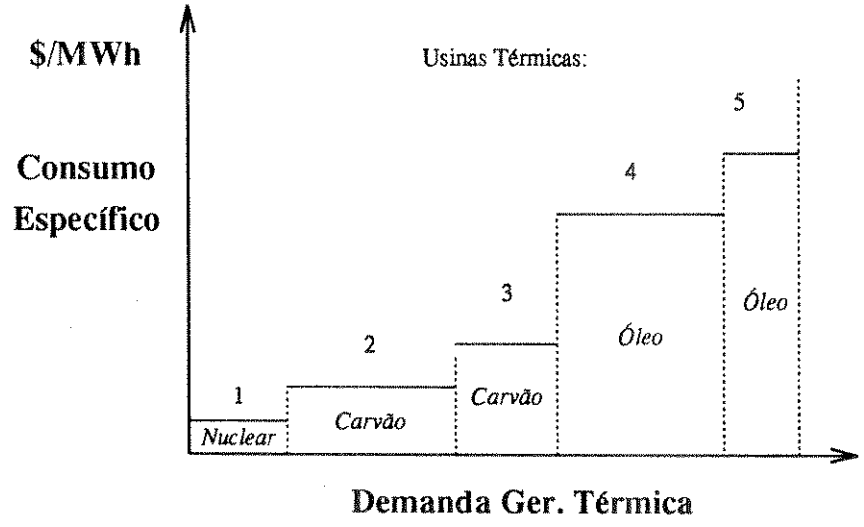

Figura 3.10: Curva de Cons. Espec. x Demanda Geração Térmica;

3.3 Representação das Vazões

A produção energética de um sistema hidrelétrico depende da série cronológica de vazões afluentes às diversas usinas que compõem o sistema. Na impossibilidade de se conhecer as vazões futuras, adota-se frequentemente a hipótese de que o registro de vazões observadas no passado, a chamada *série histórica*, dá uma idéia razoável do que pode ocorrer no futuro.

As séries históricas são obtidas através de processo laborioso baseado em medições e análises [23]. Atualmente estão disponíveis registros históricos (mensais) desde o ano de 1931.

Os estudos com séries históricas, apesar de bastante úteis, apresentam limitações que exigem o desenvolvimento de modelos de previsão (séries temporais, redes neurais, etc) que possibilitem a obtenção de séries para realização de estudos mais precisos.

Capítulo 4

Planejamento Energético e Técnicas de Modelagem

Atualmente a maioria dos países conjugam geração hidráulica e térmica configurando sistemas hidrotérmicos. O grau de um e de outro tipo de geração varia de acordo com a disponibilidade dos recursos.

A energia elétrica chegou ao Brasil em 1879. Desde então o país percebeu que tinha um grande potencial em recursos hídricos e investiu maciçamente na expansão da capacidade instalada em usinas hidroelétricas. Consequentemente o sistema brasileiro é **predominantemente hidroelétrico.**

O Brasil possui hoje dois sistemas interligados, o sistema Sul/Sudeste e Norte/Nordeste, e alguns sistemas isolados. A região sudeste consome 61% da energia elétrica produzida no país [21]. O crescimento da demanda é bastante desigual tanto por setor econômico quanto por área geográfica.

Geralmente, de modo a se atender a um acréscimo de mercado no sistema duas possibilidades são avaliadas:

- aumento dos custos operativos (geração térmica e déficit);
- incorporação (a mais econômica possível) de novas unidades geradoras.

Alguns critérios devem ser observados durante o Planejamento Energético de

modo a atender aos requisitos de mercado, assegurando uma qualidade de serviço satisfatório para os consumidores a um custo mínimo [20].

Devido a fatores aleatórios associados às capacidades de produção e às oscilações de mercado é impossível garantia total de atendimento. Portanto os critérios utilizados admitem uma margem de risco de não atendimento do mercado previsto (risco de déficit).

Em um sistema hidrotérmico, o risco de déficit pode ser associado com a insuficiência de vazões afluentes ou com a indisponibilidade devida à manutenção programada ou forçada (falhas de equipamento).

O **Planejamento da Expansão** cuida da ampliação do parque de geração hidroelétrico e termoelétrico, considerando custos e condições técnicas, econômicas e sociais, frente ao benefício para a operação do sistema como um todo no futuro;

O **Planejamento da Operação** objetiva a obtenção de uma política de decisão ótima, econômica e confiável que atenda uma demanda de energia, minimizando custos operacionais, geralmente relacionados com o custo do combustível utilizado nas usinas térmicas. As publicações e metodologias na área são diversas e se utilizam de modelos de otimização e simulação para representação e análise. Cada país adota uma metodologia específica, de acordo com as características do seu sistema de geração, disponibilidade de recursos, etc.

Nos concentraremos no Planejamento Energético da Operação segundo concepção em desenvolvimento na Unicamp [19] que constitui o escopo de estudo do presente trabalho e que envolve desde a análise de desempenho do sistema a um longo prazo até a programação semanal ou diária da geração das usinas hidroelétricas.

4.1 A Cadeia de Planejamento

O presente trabalho, como já mencionado, tem por objetivo dar suporte a decisão ao Planejamento Energético dentro do escopo do Planejamento da Operação.

O Planejamento da Operação por sua vez, pode ser subdivido segundo a classificação em grades de tempo sugerida por Anthony (Capítulo 1) e que se baseia no grau de incerteza a que certas variáveis são submetidas com o alongamento do horizonte de planejamento (demanda, vazões, etc).

Além disso, é natural que as técnicas e abordagens utilizadas para modelagem, discutidas no final desse capítulo, sejam variadas de modo a acomodar as facetas mais importantes dos mais diferentes casos. A figura 4.1 mostra as subdivisões.

4.1.1 Planejamento a Longo Prazo

A **longo prazo** a incerteza é bastante elevada. No caso brasileiro adota-se um horizonte de cerca de cinco anos. Em outros países esse horizonte pode se estender por até dez anos.

Esse tipo de planejamento, dentro do contexto do Planejamento da Operação, pode ser considerado **Estratégico** e o processo de decisão semi-estruturado. O problema permite uma abordagem matemática, embora com requintes de agregação, o que empobrece a representação do sistema e afeta os resultados obtidos.

A representação individualizada das usinas se torna difícil devido à necessidade de se representar as características estocásticas do problema. A agregação do parque hidroelétrico é feita em um único reservatório de modo a se conceber um *reservatório equivalente*.

4.1.2 Planejamento a Médio Prazo

A **médio prazo** as incertezas sobre as vazões são menores e o objetivo consiste em determinar as cotas de produção ótimas semanais para cada usina.

Esse problema pode se encaixar dentro do conceito de Controle Gerencial ou Planejamento Tático. Os processos de decisão podem ser semi-estruturados ou mesmo não-estruturados, o que exige a validação dos resultados do modelo sob diversos cenários de afluências, demandas e situações críticas.

Considera-se individualmente cada usina e o acoplamento hidráulico entre elas. Através do uso de séries temporais para obtenção das afluências previstas, torna-se o problema determinístico. O mesmo ocorre na previsão de demanda.

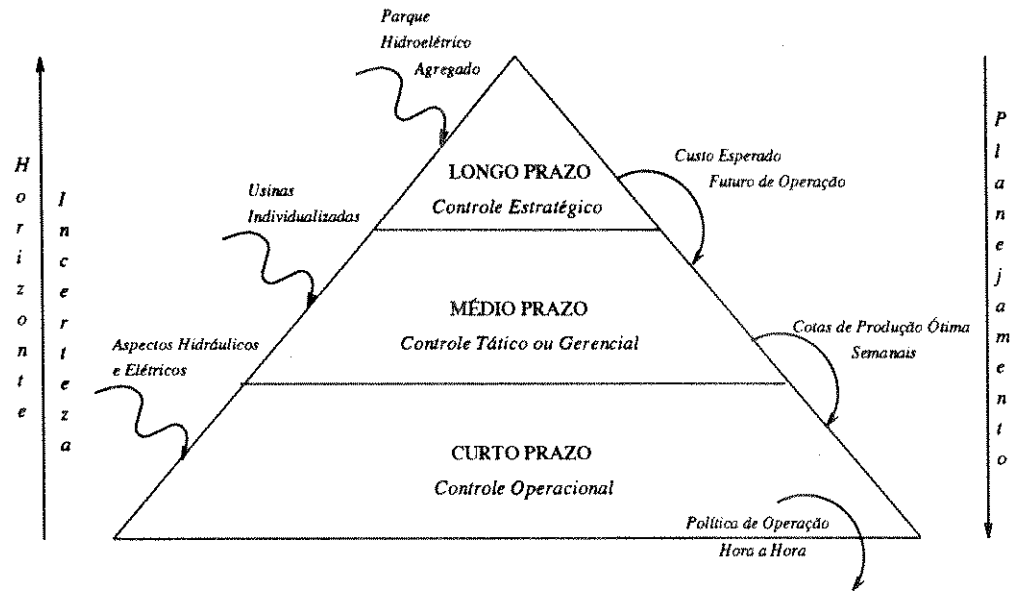

Figura 4.1: A Cadeia de Planejamento Energético

4.1.3 Planejamento a Curto Prazo

O grau de inceteza a **curto prazo** é muito baixo e as vazões podem ser consideradas conhecidas. Isso aliado ao fato de a demanda ser obtida com precisão torna o problema determinístico. Obtidas as cotas de produção semanais do médio prazo, é feita uma política de operação hora a hora ao longo de uma semana, respeitando as condições operativas do sistema, hidráulicas e elétricas.

A estratégia de controle é tipicamente operacional e o processo de decisão pode variar do estruturado ao não-estruturado.

A complexidade do Planejamento de Curto Prazo é resultante do fato de se considerar os aspectos hidráulicos e elétricos do sistema hidrotérmico. A trajetória guia obtida (política de operação hora a hora) é usada pela operação em tempo real. O atendimento aos centros de carga exige um ajuste constante das unidades geradoras, respondendo instantâneamente às variações de carga.

4.2 Modelando o Problema

O presente trabalho visa dar suporte a decisão dentro dos horizontes de longo e médio prazos. Portanto, a partir de agora, nos concentraremos nas estratégias de modelagem sugeridas para estes níveis da cadeia de planejamento.

Com relação ao problema de modelagem do sistema como um todo, notamos que:

- existe uma interdependência, devido ao acomplamento entre as usinas hidroelétricas, ou seja, o sistema é interconectado;
- o problema é dinâmico e estocástico, o que se deve ao acoplamento entre as decisões operativas no tempo (a disponibilidade em um dado instante depende do grau de utilização anterior) e a incerteza com relação a demanda de energia e vazões afluentes futuras;
- o custo de geração bem como a característica de geração é não linear;

No modelamento, o parque termoelétrico e a demanda de energia são representados em termos da função objetivo. As funções de custo não linear da operação das usinas térmicas são utilizadas. Os benefícios associados à produção de energia nas hidroelétricas passam a ser medidos em função da economia de combustível na geração térmica.

Os modelos são quantitativos e podem ser divididos basicamente em dois grupos. O primeiro, envolve os modelos de otimização (normativos), os de agregação e os de desagregação. O segundo, compreende os simuladores (descritivos).

4.3 Modelos de Otimização

4.3.1 Modelo Equivalente (ME)

Define-se por **Modelo Equivalente (ME)** de um sistema hidrotérmico de geração ao conjunto formado pelos seguintes módulos: um sistema equivalente ao conjunto de usinas, um modelo estocástico de tratamento da energia afluente ao sistema e um modelo de Programação Dinâmica Estocástica (PDE) para otimização da operação do sistema [16].

Sistema Equivalente - SE

O principal objetivo na aplicação do SE é a transformação de um sistema hidrotérmico multireservatórios em um sistema composto por um **único** reservatório que represente todo o potencial energético do primeiro. Assim, consegue-se uma redução das variáveis de estado envolvidas no problema de otimização do sistema e a PDE pode ser utilizada sem o problema da *maldição da dimensionalidade* [16].

A técnica de agregação dos reservatórios baseia-se na estimativa da energia produzida pelo completo esvaziamento (em termos de volume útil) de todos os reservatórios do sistema, dado um estado inicial de armazenamento. Ou seja, dada uma regra de esvaziamento, o SE estima quanta energia este sistema pode gerar. O modelo em uso atualmente considera que o esvaziamento é feito paralelamente, procedimento que não tem nenhum caráter de otimalidade.

O Sistema Equivalente contempla também o cálculo de um histórico de energia afluente (controlável, de vazão mínima e a fio d'água) ao reservatório equivalente a partir do histórico de vazões naturais afluentes aos reservatórios do sistema.

Modelagem da Energia Afluente

No processo de modelagem da energia afluente ao sistema, é necessária a escolha de um processo que consiga uma boa representação do comportamento da mesma ao longo do histórico. Observando a metodologia adotada pelo GCOI (Grupo de Coordenação da Operação Interligada) da Eletrobrás, optou-se por um processo *auto-regressivo de ordem 1* **(AR(1))**, também chamado de *Processo Markoviano*, o qual considera que a energia afluente ao sistema num período t qualquer só depende do valor de energia afluente que ocorreu no período $t-1$. A partir desta escolha, construiu-se um modelo que fornecesse a distribuição de probabilidades condicionadas das energias afluentes mês a mês. O modelo fornece, baseado no histórico de energia apresentado, doze (12) matrizes que serão utilizadas a cada ano de otimização por PDE.

Programação Dinâmica Estocástica

O objetivo principal do Planejamento a Longo Prazo pode ser visto como a obtenção de uma política ótima de defluências $(u_t, t = 1, ..., T)$ que minimize o custo esperado de operação do sistema ao longo do horizonte de planejamento e que obedeça a restrições operativas do sistema.

Adotando a dependência de ordem 1 para a energia afluente ao sistema, ou seja, uma formulação básica para o problema é a seguinte:

$$\min_{u_t} \mathrm{E}_{y_t/y_{t-1}} \left\{ \sum_{t=1}^{T} c_t(u_t, x_t) \right\} \tag{4.1}$$

sujeito a:

$$x_{t+1} = x_t + y_t - u_t$$

$$\underline{x} \leq x_t \leq \overline{x} \tag{4.2}$$

$$\underline{u} \leq u_t \leq \overline{u}$$

onde:

- $\mathrm{E}_{y_t/y_{t-1}}\{.\}$ - valor esperado condicionado à ocorrência de uma energia afluente y_t no período t dado que ocorreu uma energia afluente y_{t-1} no período $t-1$;
- y_t - energia afluente ao sistema no período t;
- T - horizonte de planejamento;
- $c_t(.)$ - custo de operação no período t;
- u_t - energia defluente do sistema no período t;
- x_t - energia armazenada no sistema no período t.

A metodologia aplicada na solução do problema que permite um tratamento apropriado da natureza estocástica do mesmo é a PDE [16].

Regras Otimizadas de Operação de Reservatórios

Durante o processo de agregação para obtenção do SE e também no estabelecimento de políticas de operação a serem utilizadas nos modelos de simulação (vide Seção 4.4), faz-se necessário o estabelecimente de **Regras de Operação de Reservatórios (ROR's)** para o sistema em estudo. Uma ROR estabelece a relação entre o estado de armazenamento de um reservatório e o estado do sistema, tendo grande importância na metodologia de operação do sistema brasileiro. Um método para obtenção de ROR's otimizadas é proposto em [13] [14].

Dentro do escopo do presente projeto consideramos um ME que utiliza tanto regras paralelas como regras otimizadas (Figura 4.2). Chamaremos **Modelo Equivalente Convencional**, o ME que utiliza na sua agregação o conceito de operação em paralelo dos reservatórios.

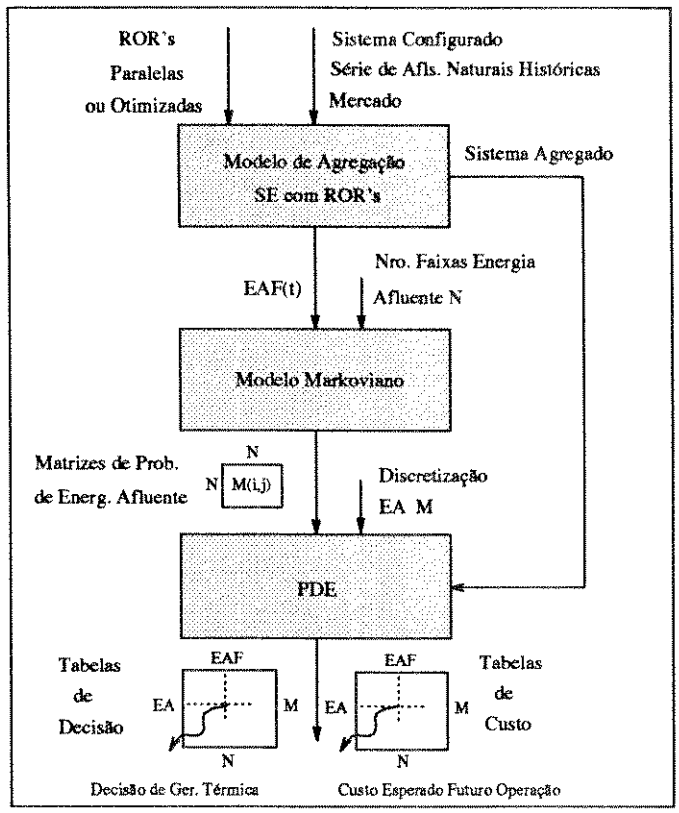

Figura 4.2: Modelo Equivalente (ROR's Otimizadas ou Paralelas);

4.3.2 POSH

No Planejamento a Médio Prazo é interessante saber quanto cada usina deve gerar de modo a se conseguir o melhor rendimento hidráulico do sistema, evitando-se vertimentos, perdas de produtividade, etc.

A metodologia adotada é a otimização determinística do sistema hidroelétrico individualizado baseada em previsão de vazões fornecidas por modelos de Séries Temporais [20].

O problema pode ser formulado como

$$\min \left\{ \sum_{t=t_o}^{t_2} \Psi(H(t)) + v(a(t_2)) \right\} \tag{4.3}$$

sujeito a:

$$H_j(t) = \sum_{j=1}^{M} p_j(x_j(t), u_j(t))$$

$$a(t_2) = \sum_{j=1}^{M} \overline{p}_j x_j(t_2)$$

$$x_j(t+1) = x_j(t) + y_j(t) - u_j(t) - \sum_{k \epsilon \Omega} u_k(t)$$

$$\underline{x}_j(t) \leq x_j(t) \leq \overline{x}_j(t)$$

$$\underline{u}_j(t) \leq u_j(t) \leq \overline{u}_j(t)$$

$$x_j(t_o) \; dado$$

onde:

- M - número de usinas hidroelétricas;
- $p_j(.)$ - função de produção da hidroelétrica j (veja Capítulo 3);
- $a(t_2)$ - energia armazenada;
- $x_j(t)$ - volume de água armazenado no reservatório j no início do período t;
- $u_j(t)$ - volume de água defluente na hidroelétrica j no período t;
- $\overline{p}_j$ - produtividade acumulada da hidrolétrica j;
- $y_j(t)$ - volume de água afluente (incremental) ao reservatório j no período t;
- Ω_j - conjunto de indíces das hidroelétricas imediatamente a montante da hidroelétrica j.

O sistema individualizado pode ser representado por uma rede. Um algoritmo de fluxo em redes mínimo não linear canalizado foi desenvolvido especificamente para resolução desse problema: o **Programa de Otimização de Sistemas Hidrotérmicos, POSH** [12], que explora a estrutura particular da rede.

Na função objetivo são considerados o custo da complementação termoelétrica ao longo do horizonte $[t_0, t_2]$ e o custo esperado futuro de operação (longo prazo) $v(a(t_2))$, função da energia armazenada $a(t_2)$.

As políticas de decisão ótimas são dadas por trajetórias de defluência $u_j(t)$ e volume $x_j(t)$ em função do tempo (ao longo do horizonte de planejamento).

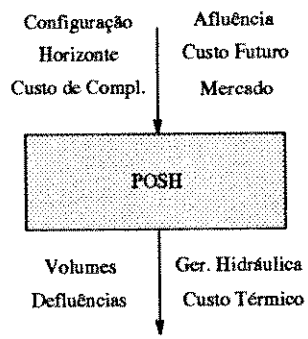

Figura 4.3: POSH;

4.4 Modelos de Simulação

Esforços têm sido feitos no sentido de se desenvolver um programa [17] que simule a implementação das decisões geradas pelos modelos de otimização citados anteriormente e aqui chamadas de **Ferramentas de Decisão** (Figura 4.4).

No Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas, as metas de geração são distribuídas entre as usinas do sistema e cumpridas em termos das afluências da série utilizada, e não em termos energéticos (Energia Afluente). Um novo estado para o sistema é obtido uma vez cumprida uma meta de geração. Um protótipo já se encontra em fase de testes.

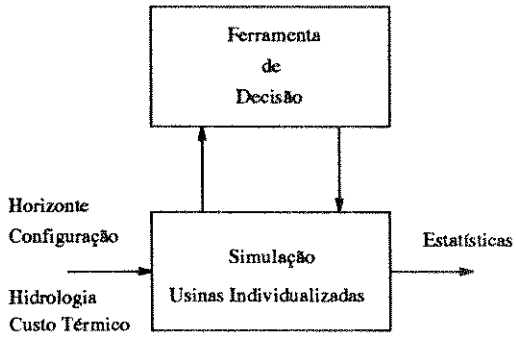

Figura 4.4: Simulação Usinas Individualizadas;

Estão atualmente disponíveis duas Ferramentas de Decisão:

- **ME com ROR's:** O sistema hidroelétrico é agregado. As políticas, também agregadas, são obtidas através de um Modelo Equivalente (ME) utilizando as tabelas de decisão da PDE. Nesse caso é necessário que as políticas sejam desagregadas antes de serem simuladas; o desagregador trabalha segundo ROR's, paralelas ou otimizadas, levantadas para cada reservatório do sistema configurado.

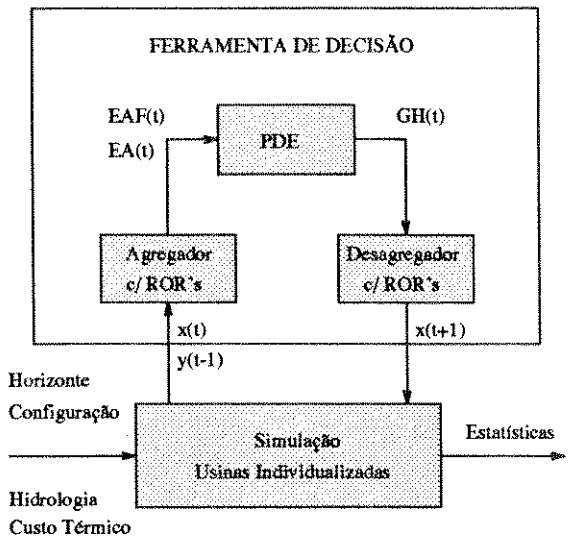

Figura 4.5: ME como Ferramenta de Decisão;

- **Posh - Estado Final Fixado**: Nesse caso, o modelo é individualizado, restando apenas distribuir as metas entre as usinas do sistema.

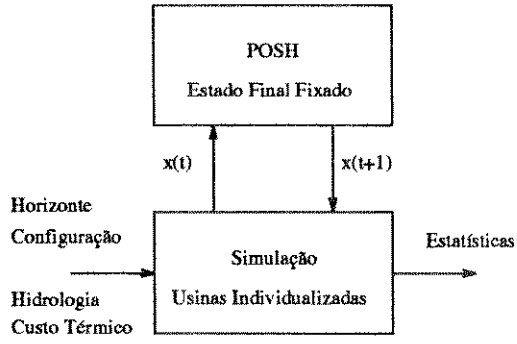

Figura 4.6: Posh como Ferramenta de Decisão;

O Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas permitirá desenvolver importantes estudos, uma análise comparativa entre as políticas geradas com os diferentes modelos e, consequentemente a obtenção de políticas melhores e confiáveis.

4.5 Varreduras

Mecanismos que possibilitam a execução de um determinado otimizador ou mesmo do simulador a usinas individualizadas para diferentes hidrologias devem ser criados.

Atualmente existe um programa que faz a varredura do histórico de vazões da Eletrobrás configurando automaticamente diferentes cenários hidrológicos para o POSH. Esse tipo de varredura permite a coleta de médias e curvas de permanência, assegurando estudos mais representativos.

Capítulo 5

Modelagem de Dados

Tomadores de Decisão possuem muitas vezes diversas alternativas. Para que a decisão tomada seja efetiva é necessário que todas as informações sobre um determinado problema sejam organizadas e então apresentadas, de forma efetiva ao tomador de decisões.

As informações a serem modeladas podem ser provenientes de fontes variadas:

1. experimentos, amostragem e observação simples;
2. modelos de sistemas (simulação, otimização, etc) e
3. mais recentemente, a modelagem do conhecimento de especialistas.

A complexidade dos sistemas organizacionais tem tornado a tarefa de planejamento muitas vezes árdua, ou mesmo impossível sem a utilização das tecnologias da informação. Qualquer planejamento sério deve se preocupar com a modelagem de toda informação proveniente das fontes citadas acima, na ordem natural em que elas se fizerem necessárias.

A modelagem do conhecimento é feita quando já se tem grande sensibilidade do comportamento do sistema modelado. Tal sensibilidade só é obtida através de estudos sérios com as informações provenientes das fontes 1 e 2. Muitas vezes o conhecimento de especialistas em operação é proveniente de muitos anos de trabalho com informações do tipo 1.

No caso específico do Planejamento Energético observa-se a existência dos três conjuntos de informações:

- Um conjunto de **Informações Básicas**, cuja função é basicamente descritiva; provenientes de experimentos, amostragem e observação simples. São elas que descrevem as entidades do sistema por exemplo, a entidade "hidroelétrica" pode ser descrita através de seus atributos: volumes, capacidade de geração, etc.
- Um conjunto de **Informações de Estudos**, que são geradas durante o trabalho com um ou mais modelos. Descrevem cenários, o sistema configurado e o próprio estudo, através das relações entre as entidades que o descrevem. Para que se trabalhe com as informações desse nível é necessário o acesso às informações do nível anterior.
- Finalmente, o **Conhecimento de Especialistas**, sobre como operar, gerenciar os recursos de um sistema. O conhecimento pode muitas vezes ser descrito de forma simples, utilizando regras, mas existem formas mais complexas e abstratas.

Organizar e apresentar essas informações de forma efetiva e interativa deve ser um objetivo básico de todo SAD. Isso pode ser feito através de técnicas de "Gerenciamento de Bancos de Dados" e "Interfaces Amigáveis".

5.1 Os Dados Básicos do Sistema

No Capítulo 3, fizemos um estudo sobre a representação de três entidades, necessárias ao modelamento de um parque termoelétrico: hidroelétricas, termoelétricas e vazões históricas. Discutiremos aqui um modelo entidade-relacionamento (MER) para os dados básicos do sistema (figura 5.1). Detalhes sobre as entidades podem ser encontrados no Dicionário de Dados (Apêndice A).

Em 1983, o **GTMC**, Grupo de Trabalho de Metodologias e Critérios, orgão da **Eletrobrás**, iniciou um trabalho de obtenção de um cadastro de aproveitamentos hidroelétricos. O objetivo é tornar disponíveis as informações necessárias à utilização dos modelos matemáticos preconizados pelo **SCEN**, Subcomitê de Estudos Energéticos, para o desenvolvimento das atividades de planejamento. Somente em 1985 os dados levantados

começaram a ser compilados e redefinidos de modo a se obter um cadastro consistente. Atualmente a constituição final do **Cadastro Técnico de Usinas Hidroelétricas** possui um levantamento completo de dados obtidos das empresas (e outros calculados) a respeito das hidroelétricas. Esse cadastro possui também um "glossário" que conceitua os dados referidos no mesmo, de modo a compatibilizá-lo com as expectativas dos modelos.

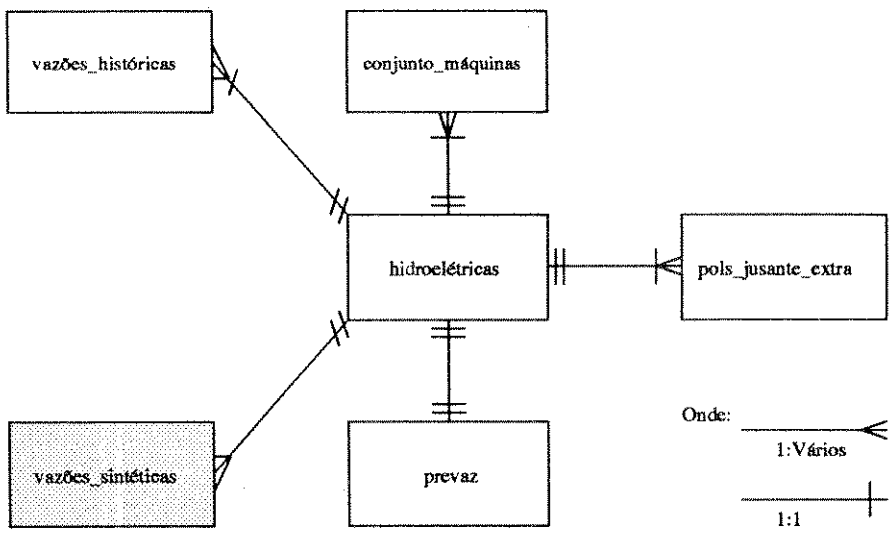

Figura 5.1: MER para os Dados Básicos;

Tal cadastro foi utilizado no nosso levantamento dos atributos que descrevem a entidade **hidroelétricas**. Foi feita uma compatibilização com os modelos discutidos no Capítulo 4 com relação às unidades adotadas e então foram criadas as entidades **polinômios_jusante_extra** (para os polinômios extra das usinas com afogamento do canal de fuga) e **conjunto_máquinas** (para os atributos específicos dos conjuntos de máquinas) que, para efeitos de normalização, estão relacionadas com hidroelétricas.

Também foram modelados os dados referentes aos atributos da entidade **termoelétricas**. Para tal, foi utilizado o Plano de Operação da Eletrobrás, uma vez que não foi encontrado um cadastro técnico disponível.

Uma entidade fraca é aquela cuja existência está condicionada a existência de uma outra entidade. Uma entidade fraca **vazões_históricas**, relacionada com **hidroelétricas**, foi criada utilizando um banco de histórico de vazões que registra as vazões

afluentes aos postos de medição correspondentes a cada hidroelétrica (em base mensal) desde 1931. O atributo **mlt**, registra a **média de longo termo**, ou seja, a média das vazões ocorridas nesse período a cada mês.

Os atributos da entidade **prevaz**, fornecem os dados necessários aos modelos de previsão de vazões. Eles foram extraídos do cadastro técnico do **Sistema Prevaz** (S-CEN/GTMC) e estão relacionados com a entidade **hidroelétricas**. Os postos se dividem em **básicos** e **não-básicos**. As estatísticas para os postos básicos são feitas segundo atributos específicos (modelos AR/ARMA) encontrados no cadastro. Os **não-básicos** necessitam de uma lista de postos básicos a ele relacionados e posteriormente através de relações (também constantes do cadastro) fazemos as estatísticas também para os não-básicos.

5.2 Os Dados dos Estudos

Os dados dos estudos se dividem em dois grupos:

- dados para o controle e gerenciamento da utilização dos modelos;
- dados que os modelos produzem durante a sua execução.

Muitos dados necessários ao controle e gerenciamento do trabalho com os modelos devem ser armazenados. Suas relações são mostradas no modelo entidade-relacionamento da Figura 5.2.

Abaixo são comentadas algumas entidades:

- É necessário que se configure o sistema a ser estudado com dados como o nome do sistema, o nome do usuário e o conjunto de hidroelétricas cujos nomes são inseridos no atributo **nome_usina** da entidade **sistemas**.
- Configurados **sistemas**, escolhem-se os **modelos** do estudo. Tais modelos foram comentados no Capítulo 4.
- Configurado um **sistema** e os **modelos**, configuram-se **cenários**. Atributos como **mercado**, **custos** e **afluências** compõem a entidade **cenários**;

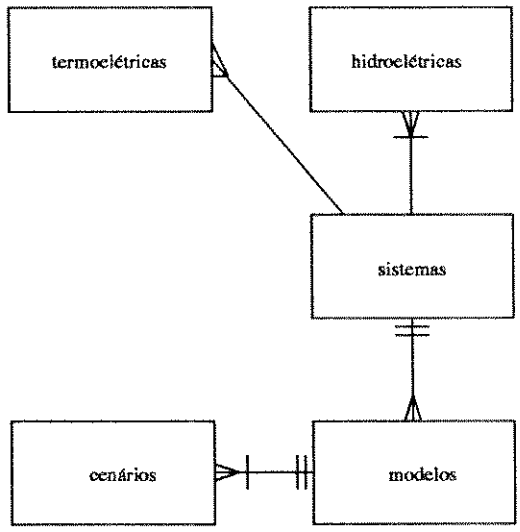

Figura 5.2: MER para os Dados dos Modelos;

Os dados produzidos durante e depois da execução, ou resultados, variam de acordo com o modelo utilizado (Capítulo 4). Foi feito um mapeamento de todos os dados necessários. No presente trabalho esses dados são gerados e armazenados em arquivos Unix, dentro dos diretórios de entrada e saída de dados do usuário (Capítulo 7).

5.3 Conhecimento de Especialistas

O modelamento do conhecimento de especialistas ainda não está previsto no âmbito desse estudo. Como foi dito anteriormente essa fase depende do bom andamento das fases anteriores e do próprio trabalho com o sistema que, acreditamos, deve aumentar a sensibilidade do planejamento como um todo.

5.4 O Banco de Dados

Os dados precisam ser organizados de forma a serem armazenados. Isso pode ser feito através da simples formatação de arquivos texto ou binários, segundo critérios do

organizador. Nesse caso a manipulação dos arquivos pode ser feita com comandos primitivos de leitura e escrita das linguagens de programação como C, Pascal, etc.

Entretanto, esse tipo de organização possui desvantagens pois, fica a cargo do programador desenvolver todas as rotinas que manterão a consistência, a integridade e a segurança dos dados. Além do mais, quando a quantidade de dados é muito grande, torna-se necessário o uso de técnicas de consulta e atualização complicadas. Tudo isso levou ao desenvolvimento dos Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados (SGBD).

Os SGBD foram desenvolvidos para fornecer todos esses recursos no trabalho com Bancos de Dados modelados segundo técnicas específicas. A abordagem Relacional, a Hierárquica e a em Rede são as mais comuns. Entretando, foi a abordagem Relacional que mais obteve sucesso comercial e, os principais SGBD do mercado (Ingres, Oracle, Zin, etc) utilizam essa técnica.

Em Modelo Relacional de dados, usuários e programadores podem trabalhar com os dados e visualizá-los como tabelas bi-dimensionais ou relações.

A principal vantagem do modelo relacional é a estrutura *flat* dos arquivos. Entretanto a redundância de dados entre as relações conduz a uma ineficiência com respeito ao armazenamento e atualizações múltiplas. Isso é melhor trabalhado pelo Modelo em Rede que no entanto é embaraçoso de se entender e manipular. Alguns bancos trabalham a nível físico com o modelo em redes e, a nível lógico com o relacional, unindo o melhor das duas filosofias.

No presente trabalho todos os dados foram primeiramente organizados em um sistema de arquivos Unix convencionais de modo a se constituir um Banco de Dados. Posteriormente, com a aquisição de um SGBD (Ingres), foi desenvolvido um Modelo Relacional de Dados, cujos dados foram extraídos do Banco de Dados convencional.

O Banco de Dados é o núcleo do sistema proposto. Todos os processos internos do sistema, incluindo a metodologia de planejamento, ou seja, configuração de **sistemas**, **modelos** e **cenários**, são controlados através dos dados armazenados no Banco.

5.5 O SGBD Ingres

Ingres (*Interative Graphics and Retrieval System*) é um Gerenciador de Bancos de Dados Relacionais. Ele é comercializado pela *Relational Technology Inc.*

Como outros sistemas disponíveis no mercado, Ingres possui ferramentas especiais para apresentação da informação armazenada bem como extremamente flexíveis no desenvolvimento de aplicações.

Definição de Dados

Um Banco de Dados pode ser criado executando-se o comando CREATEDB a nível do sistema operacional. Interfaces com menus ou apenas com linhas de comando estão disponíveis para definição ou deleção de relações.

Manipulação de Dados

A manipulação dos dados pode ser feita via um utilitário chamado QBF (*Query by Forms*, uso de *forms*) e SQL (linha de comando, ou embutida em programas C, Fortran, etc).

Desenvolvimento de Aplicações

Uma ferramenta bastante interessante é o Gerador de Aplicações Gráficas acoplado a uma Linguagem de Quarta Geração, Windows4GL.

Outras ferramentas são: ABF (*Application by Forms*) e ESQL (*Embedded SQL*).

ABF e Windows4GL trabalham de forma semelhante e as aplicações são editadas graficamente. Em ambas o objeto de mais alto nível é a aplicação. Uma lista de componentes é mantida para cada aplicação. Uma aplicação consiste de *frames* e *scripts* (ou procedimentos).

A intenção inicial do presente trabalho era utilizar Windows4GL. Porém a quantidade enorme de problemas que surgiram (pouca memoria e baixa capacidade de processa-

mento das estações) e incompatibilidades com o sistema operacional tornaram essa tarefa praticamente impossível. Apesar disso, uma aplicação foi desenvolvida para manipulação dos dados básicos (Figura 5.3).

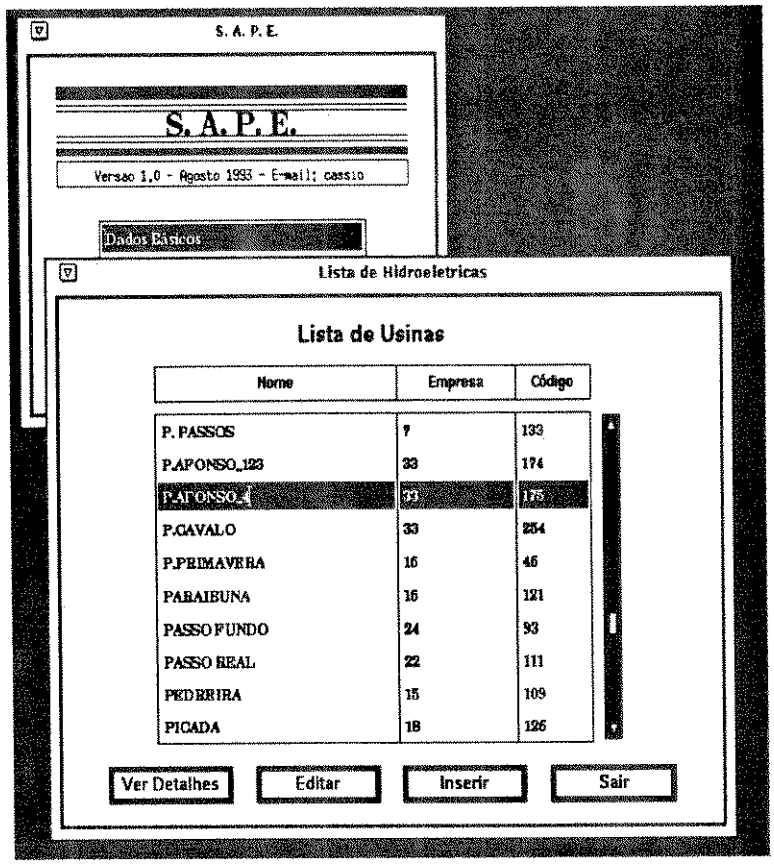

Figura 5.3: Aplicação para o Windows4GL

ESQL permite o desenvolvimento de aplicações em linguagem C (ou Fortran, Pascal, etc) com comandos SQL embutidos. Um preprocessador é utilizado e os comandos embutidos são convertidos em comandos C. Os módulos preprocessados são então compilados e "linkados" para criar um único módulo executável. Essa foi a estratégia utilizada no desenvolvimento da aplicação SAPE, que é apresentada no próximo capítulo.

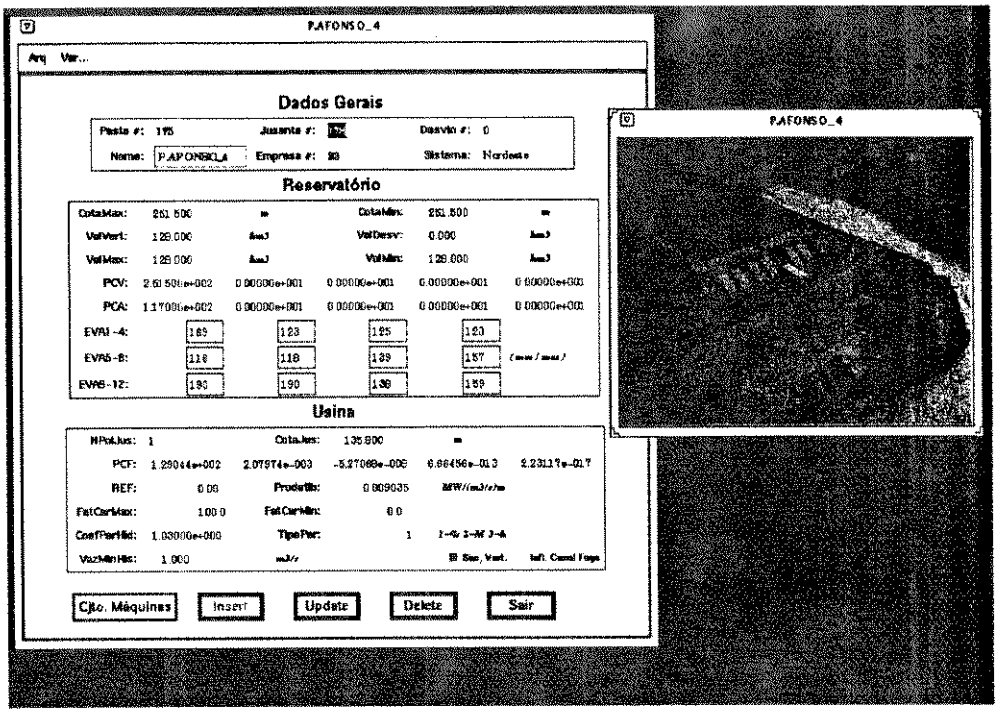

Figura 5.4: Aplicação para o Windows4GL

Capítulo 6

SAPE: Sistema de Apoio ao Planejamento Energético

O *software* SAPE é um Sistema de Apoio a Decisão (SAD) que visa integrar os trabalhos com diferentes modelos de otimização dentro do contexto dos horizontes de longo e médio prazos do Planejamento Energético da Operação; através de um ambiente amigável, onde diversas políticas são obtidas, analisadas e comparadas.

A utilização dos *toolkits* Xview e Xlib permitiu a elaboração de um ambiente gráfico no estilo OPEN LOOK, o que facilita o trabalho dos usuários já acostumados com o estilo empregado nas GUI's das estações Sun (veja Capítulo 2), além de ser bastante amigável para iniciantes. O X Windows proporciona uma linguagem de ação orientada por eventos, ou seja, quando ocorre uma ação do usuário é gerado um evento que é interpretado pelo programa.

No presente capítulo procuramos apresentar o sistema SAPE bem como uma metodologia de uso para o mesmo. Não nos prenderemos a detalhes de implementação, que serão discutidos no Capítulo 7.

6.1 Requisitos Iniciais

Na maioria das vezes, quem define os objetivos gerais para o sistema não pode definir requisitos de entrada, saída e processamento detalhadamente. A bibliografia clássica em Engenharia de Software [9] recomenda nesse caso o desenvolvimento de um protótipo (ou modelo do *software*). Decidiu-se então pela implementação de um protótipo com algumas das funções requeridas e definidas pelos objetivos gerais do projeto temático.

Dessa forma surgiu a primeira versão do sistema, o XPOSH [15], que atendia os requisitos básicos: uma base de dados, implementada com arquivos Unix convencionais, gerenciados por um módulo de entrada e saída feito em linguagem C, um modelo de otimização(POSH) e uma interface bastante amigável.

Esse primeiro protótipo, através de avaliações e refinamentos sucessivos evoluiu para a versão atual do sistema, SAPE2.0. A metodologia utilizada segue o paradigma do Modelo Espiral [9] onde versões sucessivas são obtidas à medida que percorremos uma espiral (figura 6.1). A versão atual é muito mais complexa em termos do gerenciamento de dados, modelos e interface homem-máquina.

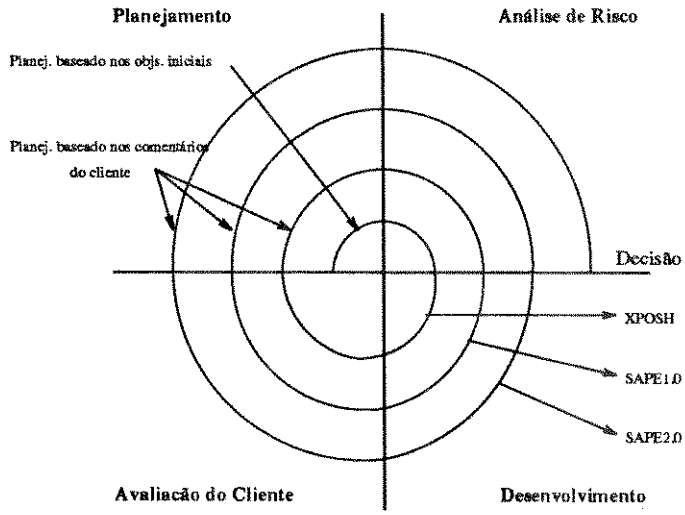

Figura 6.1: O Modelo Espiral;

O Modelo Espiral é o mais utilizado atualmente e o mais realista. É uma abor-

dagem evolutiva, que permite ao engenheiro e ao cliente avaliar riscos e tomar uma decisão quanto ao próximo nível de evolução do sistema.

6.2 O Sistema

O sistema SAPE foi construído dentro da filosofia proposta no Capítulo 2. Logicamente nem todos os requisitos ali mencionados foram preenchidos uma vez que isso demandaria um projeto específico e várias pessoas trabalhando simultaneamente em cooperação. Foram levantadas as necessidades do planejamento com relação a sistemas de informação e desenvolvido um modelo conceitual para o sistema (Figura 6.2).

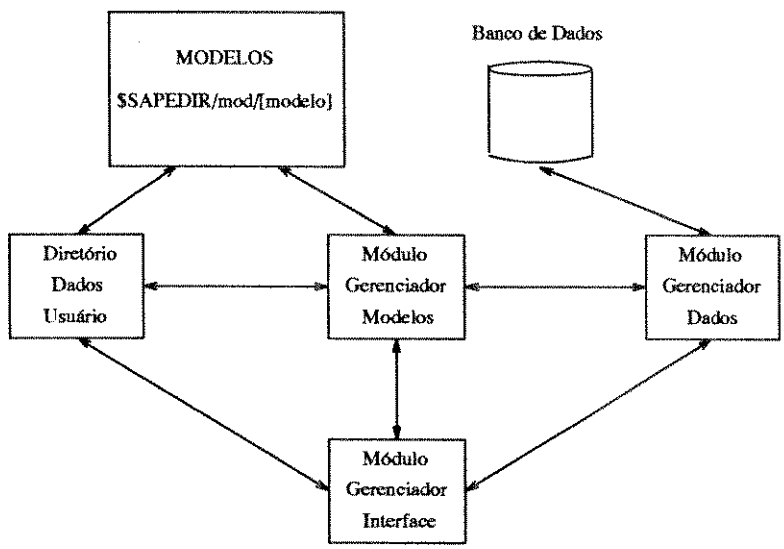

Figura 6.2: Diagrama Conceitual Sape;

Desenvolvido o modelo conceitual, dividiu-se a fase de projeto em três partes correspondentes aos três maiores componentes de um SAD: Banco de Dados e seu gerenciamento, Banco de Modelos e seu gerenciamento e Interface com o Usuário.

Como já foi dito no capítulo anterior o Banco de Dados **Sape** é o núcleo do sistema pois armazena informações que são manipuladas pelas rotinas do Subsistema Gerenciador de Modelos (SGM) e pelo Subsistema Gerenciador de Interface (SGI).

O SGM verifica a configuração do estudo determinado e grava todos os dados necessários para executar o(s) modelo(s) requisitado(s) em um diretório de dados do usuário (veja Apêndice B). Essa estratégia é necessária pois mantém a funcionalidade dos modelos, permitindo que mesmo aqueles desenvolvidos em diferentes linguagens sejam acoplados com facilidade ao sistema, através de uma especificação dos dados de entrada.

O SGI gerencia o ambiente necessário para se configurar estudos, executar modelos e observar os resultados obtidos. Um módulo interessante (capítulo anterior, última seção), ainda não concluído devido a problemas com o Windows4GL, permitirá acesso aos Dados Básicos do sistema para visualização (usuário comum) e deleção/atualização (administrador do sistema).

O SGD acessa todos os dados necessários aos outros dois subsistemas, o que pode ser feito de duas formas como veremos a seguir.

6.2.1 Gerenciamento de Dados

O sistema foi desenvolvido em duas versões, que diferem basicamente quanto ao gerenciamento dos dados. Uma trabalha diretamente com arquivos convencionais UNIX, outra utiliza recursos de Gerenciamento de Bancos de Dados.

A versão do sistema que trabalha diretamente com dados formatados em arquivos texto do Unix (veja como esses arquivos estão organizados e formatados no Apêndice B), é acessada diretamente através do comando **sape**, por exemplo:

bohemia.densis# sape

A versão que trabalha com o Gerenciador de Banco de Dados Relacional Ingres, é acessada diretamente através do comando **iisape**, ou seja:

bohemia.densis# iisape

Porém, nesse caso, alguns requisitos devem ser previamente observados:

1. Os processos residentes do Ingres devem estar inicializados nas máquinas servidora e clientes;

2. Deve ser solicitado ao Administrador do Banco de Dados que o usuário seja cadastrado como usuário Ingres nas máquinas servidora e clientes;
3. As devidas permissões para consultas às tabelas do Banco de Dados **Sape** devem ser configuradas.

Tomadas essas medidas, o que se observa de imediato, ao executar as duas versões, é que a primeira (convencional) é bem mais rápida. Isso ocorre porque existe um *overhead* de processamento decorrente dos processos de segurança, integridade e mecanismos de consulta às tabelas do Banco de Dados.

6.2.2 O Gerenciamento de Modelos

O gerenciamento dos modelos é feito por um conjunto de módulos que controla a execução e a integração dos mesmos. O usuário não necessita conhecer detalhadamente os modelos, mas sim a metodologia de trabalho e as variáveis e parâmetros envolvidos (Capítulo 2).

Os dados necessários são configurados e se tornam disponíveis automaticamente. Os dados de saída são colhidos e formatados de modo que possam ser visualizados e manipulados pelo Gerenciador de Interface. Existe um diálogo interno entre os Gerenciadores de Modelos e de Dados, não perceptível para o usuário.

O sistema operacional **SunOS é multitarefa** e o Sistema de Janelamento X Windows foi construído especificamente para esse tipo de sistema, o que **permite a execução de um ou mais modelos enquanto o usuário gera novos cenários e estudos**, trabalhando em diferentes ambientes (janelas), como veremos a seguir.

Essa característica é bastante interessante e permite que sistemas abertos, como o Matlab por exemplo, possam ser utilizados juntamente com o SAPE, fornecendo subsídios para estudos mais detalhados [16], [13].

6.2.3 O Gerenciamento de Interface

É através desse módulo que o usuário se comunica com os outros dois módulos

anteriores. Na filosofia dos *toolkits* Xview e Xlib uma interface é composta de objetos. Esses objetos são agrupados segundo uma hierarquia: *Frames*, depois *Panels* e então os outros objetos de diálogo.

- *Frame*: é o objeto onde são associados todos os outros objetos de modo a compor uma interface, podem ser fixos ou no estilo *popup*;
- *Control Panel*: (ou painel de controle) é uma área de controle no *frame* onde são criados os objetos de diálogo (botões listas de escolha, etc);
- *Canvas*: é um painel. Porém sua função é proporcionar uma área de desenho (como um painel para pintura feito de lona), onde são apresentados elementos gráficos (linhas, círculos, etc);
- *Term Panel*: (ou painel de terminal) é uma área cuja função é proporcionar um terminal onde são editados comandos e exibidas mensagens;
- *Text Panel*: (ou painel de texto) é uma área onde são mostrados ou editados textos;
- *Menu*: objeto associado com a criação de listas de opções no estilo *pulldown* e *pull-right*;
- *Button*: (ou botão) é um objeto de diálogo. Ele pode ser associado aos painéis de modo que, quando apertado, desencadeia um evento que por sua vez desencadeia uma sequência de comandos no programa;
- *Choice Lists*: (ou listas de escolha) é um objeto de diálogo similar a *buttons* agrupados em conjunto (e de aparência diferente), onde cada *button* é uma opção. Podem ser *exclusivas* ou *não-exclusivas*.
- *Text Fields*: (ou campos) é onde são digitados textos ou valores numéricos a serem lidos pelo programa. Podem ser exclusivamente numéricos (valores inteiros até 100) ou alfanuméricos.

A seguir procuramos esboçar os principais componentes da interface do SAPE. A ordem procura acompanhar a metodologia de trabalho com o sistema.

6.3 Interface Homem-Máquina

6.3.1 Frame Principal - Sape 2.0

O **frame** principal (figura 6.3) é composto dos seguintes objetos de interface:

- No centro um *term panel* oferece uma área destinada à comunicação de resultados sobre a execução de modelos, bem como uma linha de comando para execução de comandos Unix ou outros programas quando se fizerem necessários;
- Na barra de rodapé à direita, são exibidas mensagens do programa ao usuário;
- No painel de controle, acima da área de terminal, estão colocados 5 botões: **Aproveitamentos**, **Otimização**, **Simulação**, **Deletar** e **Sai**, onde são selecionadas as opções do usuário.

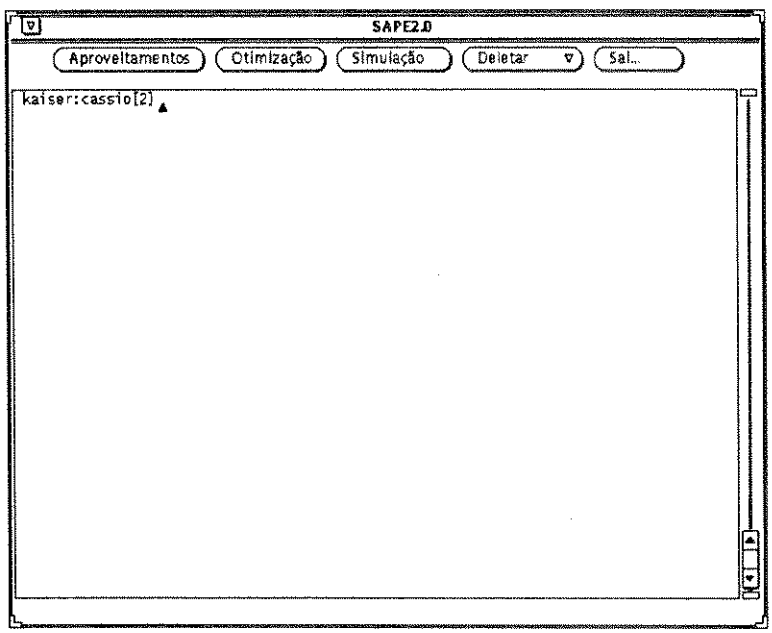

Figura 6.3: Tela Principal do SAPE

6.3.2 Aproveitamentos

Ao se clicar com o *mouse* o botão **Aproveitamentos** é gerado um *popup frame* (figura 6.4), composto dos seguintes componentes:

- Um painel de controle onde são esboçados graficamente os aproveitamentos hidroelétricos, segundo um diagrama esquemático fornecido pela Eletrobrás. Basta se clicar a usina escolhida com o *mouse*;
- Um botão **Volumes Úteis**;
- Um botão **Sai.**

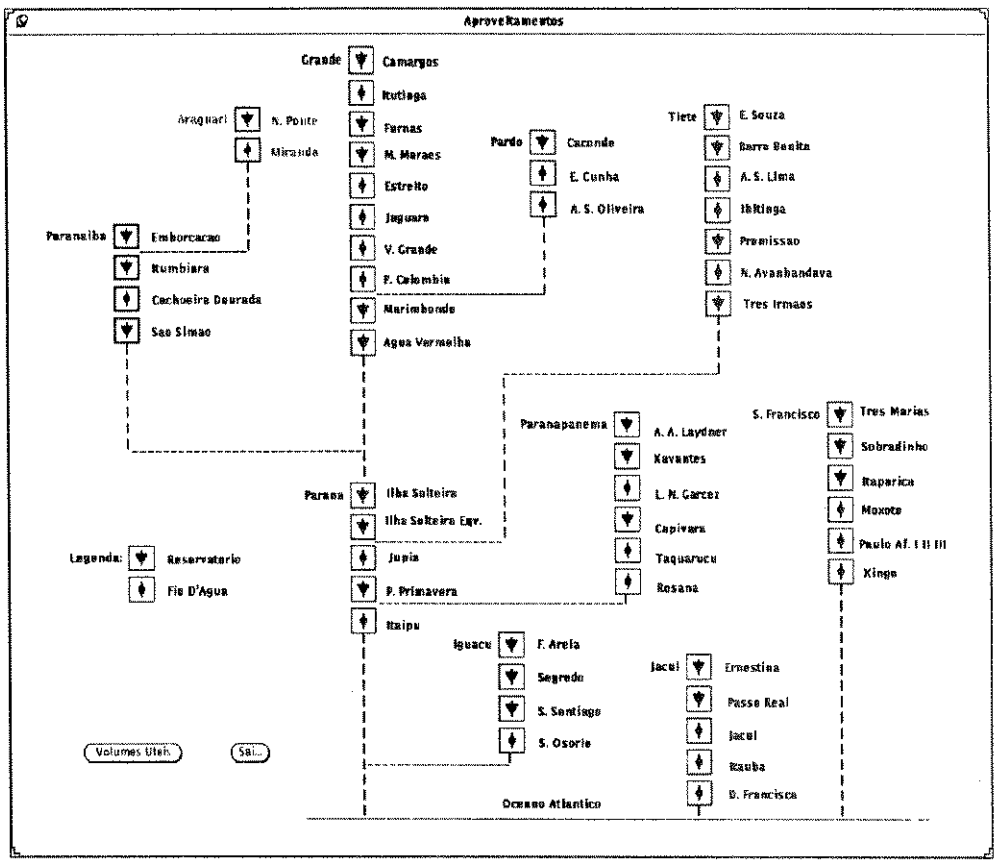

Figura 6.4: Diagrama dos Aproveitamentos Hidroelétricos

O botão **Volumes Uteis** (6.5) chama um *popup frame* onde são fixados os volumes iniciais e finais (em % do volume útil) para cada reservatório incluído na configuração

do sistema. O **default** é 100% do volume útil. As usinas a fio d'água, como não possuem regulação não necessitam fixação dos volumes iniciais e finais.

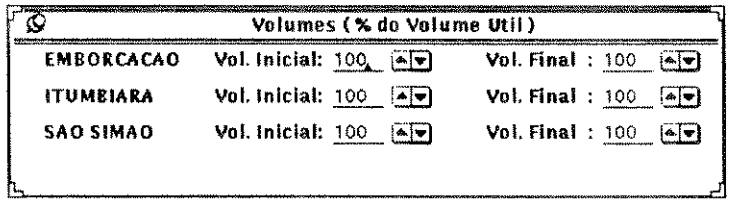

Figura 6.5: Fixação dos Volumes Utéis

6.3.3 Otimização

Configurado o sistema físico que se deseja trabalhar, pode-se então realizar estudos de Otimização. Ao se clicar o botão **Otimização** é mostrado um *popup frame* (figura 6.6), com os seguintes botões: **Gráficos**, **Relatório**, **Cenário**, **Configura** e **Otimiza**.

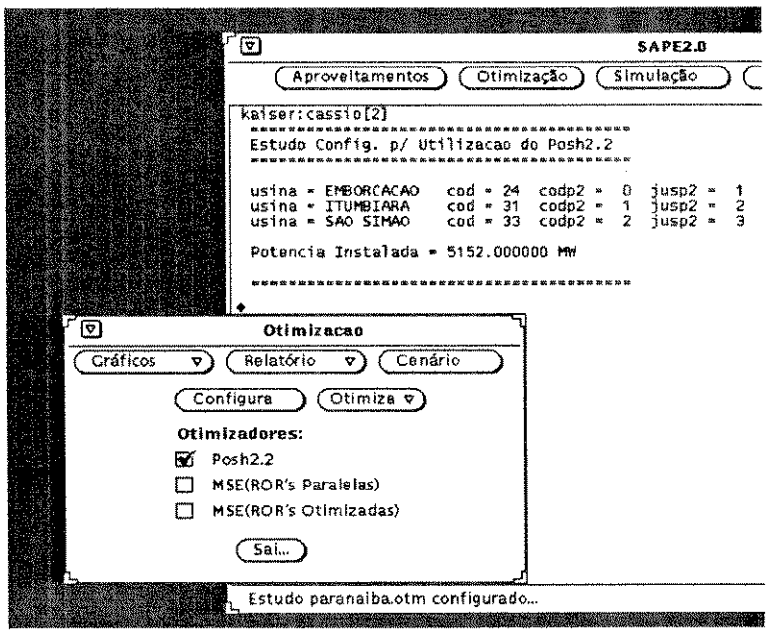

Figura 6.6: Estudos de Otimização

Uma lista de escolha também é mostrada para que se escolha com qual otimizador se deseja trabalhar.

Criando Cenários

Ao se clicar o botão **Cenário** é mostrado um *popup frame* (figura 6.7), onde estão esboçados objetos em três áreas distintas do painel de controle. É aqui que serão configurados o cenário de afluências, demandas e classes térmicas a serem consideradas na função objetivo.

As três áreas separadas no painel são: Hidrologia, Demanda e Função Objetivo.

Na área do painel destinada a **Hidrologia** são mostrados os objetos:

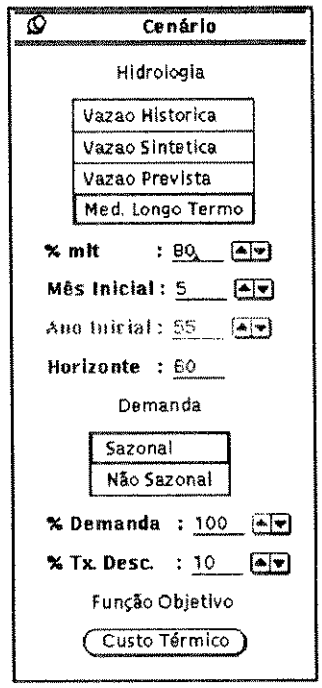

Figura 6.7: Configuração dos Cenários

- Um menu, que permite a escolha do tipo de vazão a ser utilizada: Histórica, Séries Sintéticas, Prevista (modelos AR/ARMA, redes neurais). ou a Média de Longo Termo (MLT);
- Campos numéricos, que permitem a configuração do **mês inicial**, do **ano inicial** e do **horizonte**. Se a escolha for a MLT, um campo número permite a configuração da sua porcentagem;

Na área destinada a **Demanda**:

- Um menu, que permite a escolha de uma curva de demanda Sazonal, ou Não Sazonal (Flat), levantada tomando como referência a Potência Instalada total do sistema configurado;
- Campos numéricos, que permitem a configuração de uma porcentagem da Potência Instalada (considerada no levantamento da demanda) e uma porcentagem da Taxa de Desconto;

Na área destinada a **Função Objetivo**, um botão **Custo Térmico**, quando clicado chama um *popup frame* (figura 6.8) que pede a quantidade de classes térmicas a serem utilizadas. Dado o número de classes térmicas, um outro *popup frame* aparece, o **Editor de Classes Térmicas**. São então configuradas as classes térmicas, através dos coeficientes da curva de custo marginal e a capacidade de cada classe térmica (veja Capítulo 3). Também é configurado o Custo de Déficit.

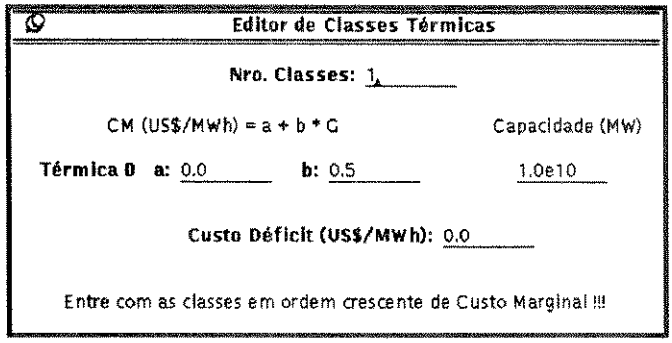

Figura 6.8: Edição de Classes Térmicas

Configurados o sistema físico e o cenário é necessário armazenar a configuração. O botão **Configura** quando apertado permite que se *batize* o estudo então configurado. Se um estudo já existir com o mesmo nome, uma mensagem é exibida.

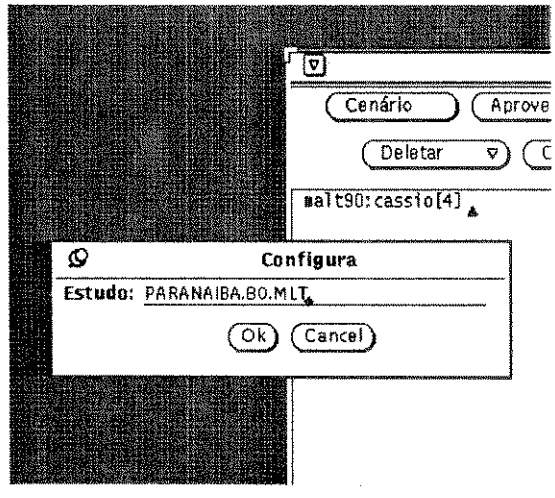

Figura 6.9: Configuração de Estudos

Trabalhando com os Otimizadores

Configurados e armazenados os dados básicos referentes a um determinado estudo, pode-se iniciar o trabalho com os modelos.

Na presente versão o sistema permite o trabalho com um modelo de longo prazo (MSE) e com um modelo de médio prazo (POSH). O modelo MSE pode ser utilizado de duas formas diferentes: com regras de agregação/desagregação paralelas ou com regras otimizadas.

Se o MSE com regras otimizadas for escolhido e não existem regras otimizadas configuradas, é chamado um Editor de Regras (*popup frame*), onde as mesmas são editadas.

Quando o botão **Otimiza** é apertado, o processo é iniciado. A sua execução pode ser acompanhada observando as mensagens de rodapé e no *term panel* da janela principal. Um outro recurso também útil é o medidor de performance da GUI da estação.

A função do botão **Gráficos** será discutida mais adiante.

O botão **Relatório** possui um menu acoplado a ele com os estudos disponíveis para geração de relatório. Se um determinado estudo for escolhido e ainda não tiver sido rodado, uma mensagem é exibida.

Ao ser apertado o botão **Relatório** um *popup frame* (figura 6.10) é mostrado com os seguintes componentes no painel:

- Uma lista com ítens para escolha do destino: Arquivo ou Impressora;
- Uma lista com ítens para escolha de como os valores devem ser impressos: Valores reais ou em Porcentagem;
- Botão **Ok** que inicia o processo de geração do relatório;
- Botão **Sai**.

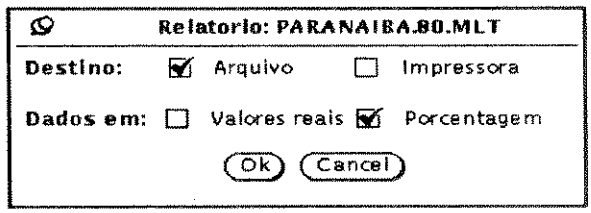

Figura 6.10: Geração de Relatório

6.3.4 Simulação

Configurado o sistema físico que se deseja trabalhar, pode-se também realizar estudos de Simulação. Ao se clicar o botão **Simulação** é mostrado um *popup frame* (figura 6.11), com os botões: **Cenário**, **Gráficos**, **Simula**, **Opera //**, **Varre/Posh** e **Sai....**

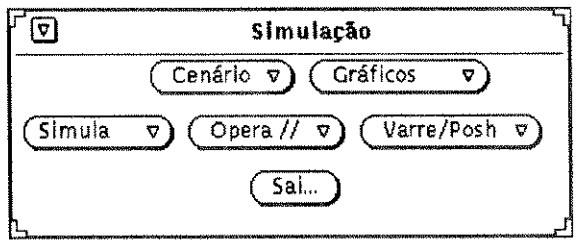

Figura 6.11: Estudos de Simulação

Criando Cenários

Ao se clicar o botão **Cenário** é mostrado um *popup menu* (figura 6.12), onde são escolhidos os cenários de acordo com o tipo de simulação que se deseja fazer.

Os cenários são similares àquele utilizado nos estudos com os otimizadores. Entretanto, nesse caso os estudos são configurados automaticamente, dando um nome ao estudo e apertando-se o botão **Configura**.

Trabalhando com os Simuladores

Ao se clicar o botão **Simula**, aparece um *popup menu*, escolhe-se o nome do estudo (extensão .sim) e é iniciada a simulação. A evolução da mesma pode ser acompanhada

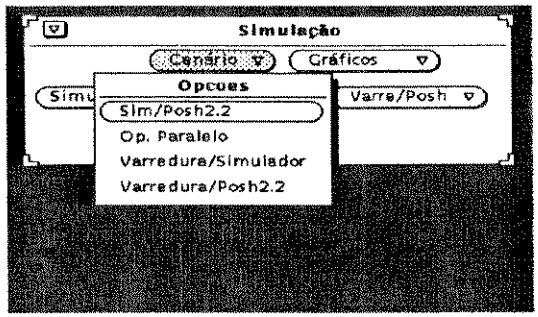

Figura 6.12: Cenário escolhido de acordo com a Simulação

na barra de rodapé.

Quando o botão **Opera //** é pressionado, aparece um *popup menu*, escolhe-se o nome do estudo (extensão .op ou .otm) e é iniciado o processo de operação em paralelo.

Ao se clicar o botão **Varre/Posh**, aparece um *popup menu*, escolhe-se o nome do estudo (extensão .vp) e é iniciada a varredura em *batch*.

Estudos para obtenção de regras de operação para os reservatórios são feitos através de estudos com o POSH, utilizando esta ferramenta de varredura. Atualmente só são permitidos estudos com o histórico de vazões. Futuramente o sistema permitirá estudos de varredura com um banco de séries sintéticas.

A função do botão **Gráficos** é discutida a seguir.

6.3.5 Gráficos

Quando se roda um modelo, os resultados são difíceis se de entender apenas numericamente. Uma maneira elegante e concisa de se apresentar os dados é através de gráficos. O presente trabalho fornece a oportunidade de se trabalhar com os resultados na forma gráfica.

Ao se apertar o botão **Gráficos**, em qualquer um dos *popup frames* de Otimização ou Simulação, o nome do estudo desejado é perguntado através de um menu e, se o estudo tiver sido executado, um *popup frame* (figura 6.14) é mostrado e, as opções variam de acordo com o tipo de estudo (.otm, .op, .sim, etc). Em geral aparecem os seguintes itens:

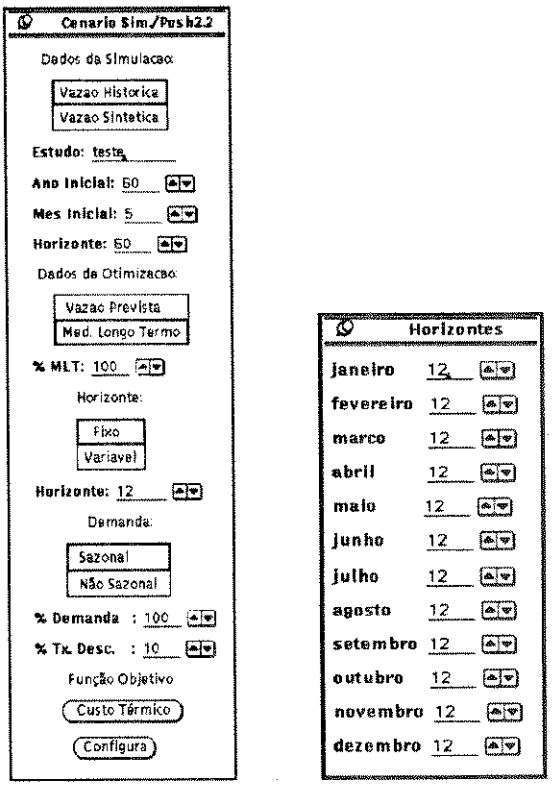

Figura 6.13: Cenário Simulação/Posh2.2

- Barra de menu (painel de controle) com 4 botões: **Usinas**, **Limpa**, **Plota** e **Sai**;
- Listas com opções de saídas gráficas.

Duas listas de opções são apresentadas em um painel de controle situado abaixo da barra de menu. Uma mostra as opções de gráficos, a outra mostra as duas formas de apresentação disponíveis: *display* e/ou impressora.

O botão **Usinas** possui um menu acoplado a ele com as usinas escolhidas durante a configuração do estudo. É interessante mencionar que se deve escolher poucas usinas de cada vez pois os gráficos ficam menos carregados e, consequentemente, mais elegantes.

O botão **Limpa** como o próprio nome indica, limpa a última configuração de usinas feitas com o botão **Usinas**.

O botão **Plota** mostra o último gráfico marcado na lista de opções. A plotagem é

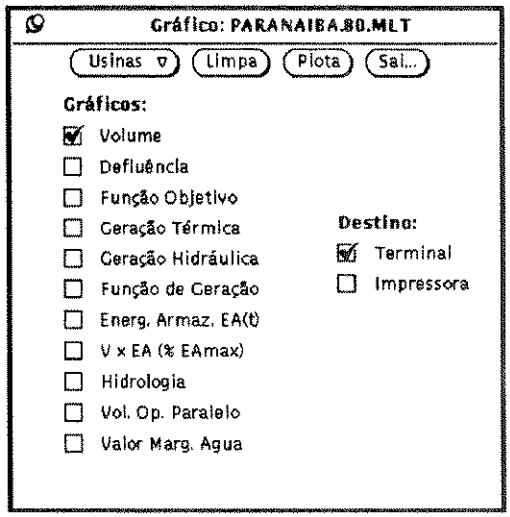

Figura 6.14: Escolha de Gráficos

feita em um *popup frame* (figura 6.15), sobre um objeto do tipo *canvas*. Podem ser plotados vários gráficos simultaneamente para efeito de comparação.

É interessante observar a barra de rodapé. Caso alguma ação seja tomada de forma errada uma mensagem é exibida.

6.3.6 Deletar

O botão **Deletar** possui um menu acoplado a ele com os estudos disponíveis para deleção. Quando uma escolha é feita o estudo escolhido é deletado e uma mensagem aparece na barra de rodapé.

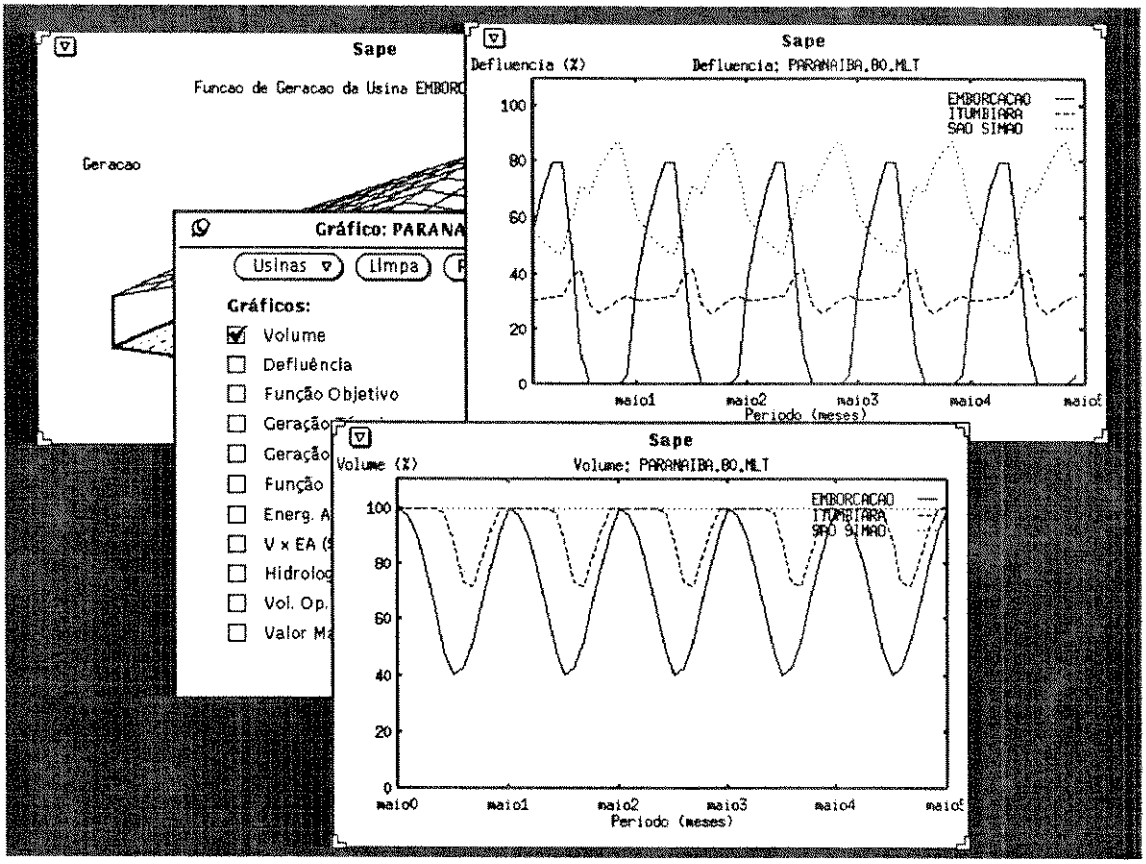

Figura 6.15: Trajetórias de Volume, Defluência, etc

Capítulo 7

Implementação

O SAPE foi implementado em linguagem C, utilizando *toolkits* para o X Windows System tais como o Xview e Xlib. As máquinas utilizadas foram estações de trabalho Sun Sparc, rodando o sistema operacional Sun-OS (*UNIX like*).

Decidiu-se por utilizar C, principalmente por ser uma linguagem já conhecida. Além disso a utilização de C, permitiu muita flexibilidade na implementação além da geração de um código executável rápido e compacto.

Duas importantes características do sistema são apresentadas: a estrutura hierárquica dos componentes principais ou módulos (sem detalhes de processos e decisões) e as estruturas de dados. Antes, porém, convém que se apresente a estrutura em que os arquivos são organizados. A formatação dos mesmos é discutida no Apêndice B.

7.1 Estrutura de Arquivos para o SAPE

O sistema SAPE está organizado em uma estrutura de arquivos única, cuja raiz é dada pelo caminho **$SAPEDIR**.

$SAPEDIR/dat/[entidade] é o diretório de dados do sistema, onde **[entidade]** é o arquivo com os dados de uma entidade específica (hidroelétricas, termoelétricas, vazões, etc). Na versão do sistema que trabalha com arquivos convencionais esse diretório funciona como banco de dados. Na versão que utiliza Ingres como gerenciador essa função é perdida e ele funciona como repositório de dados secundário, uma vez que os dados das tabelas gerenciadas pelo Ingres são extraídos daqui.

$SAPEDIR/[modelo]/ é o diretório do sistema, onde **[modelo]** é o diretório com os arquivos de um determinado modelo (POSH2.2, MEPDE, OP, PLPP, etc).

Dois diretórios são criados na área do usuário para configuração de estudos próprios. Um para guardar a configuração dos sistemas, cenários e estudos e, outro para guardar os dados gerados como resultados de um determinado estudo. São eles:

1 - **$[home do usuário]/sapedat/[estudo]**;

2 - **$[home do usuário]/sapeout/[estudo]**;

7.2 Diagramas Hierárquicos de Funções

Os diagramas hierárquicos de funções permitem uma análise das características do *software* para alterações e manutenções. Os diagramas como o próprio nome indica, são hierárquicos (*top-down*) e eles devem ser lidos da esquerda para a direita.

Nos dois primeiros diagramas (figuras 7.1 e 7.2, estão especificados de forma simplificada dois dos principais componentes da aplicação SAPE e suas ramificações.

O diagrama da Figura 7.3 contém a especificação do módulo de simulação e seus componentes.

O módulo principal é **sape.c**, que contém as rotinas para geração do *frame* principal e manipulação dos seus objetos.

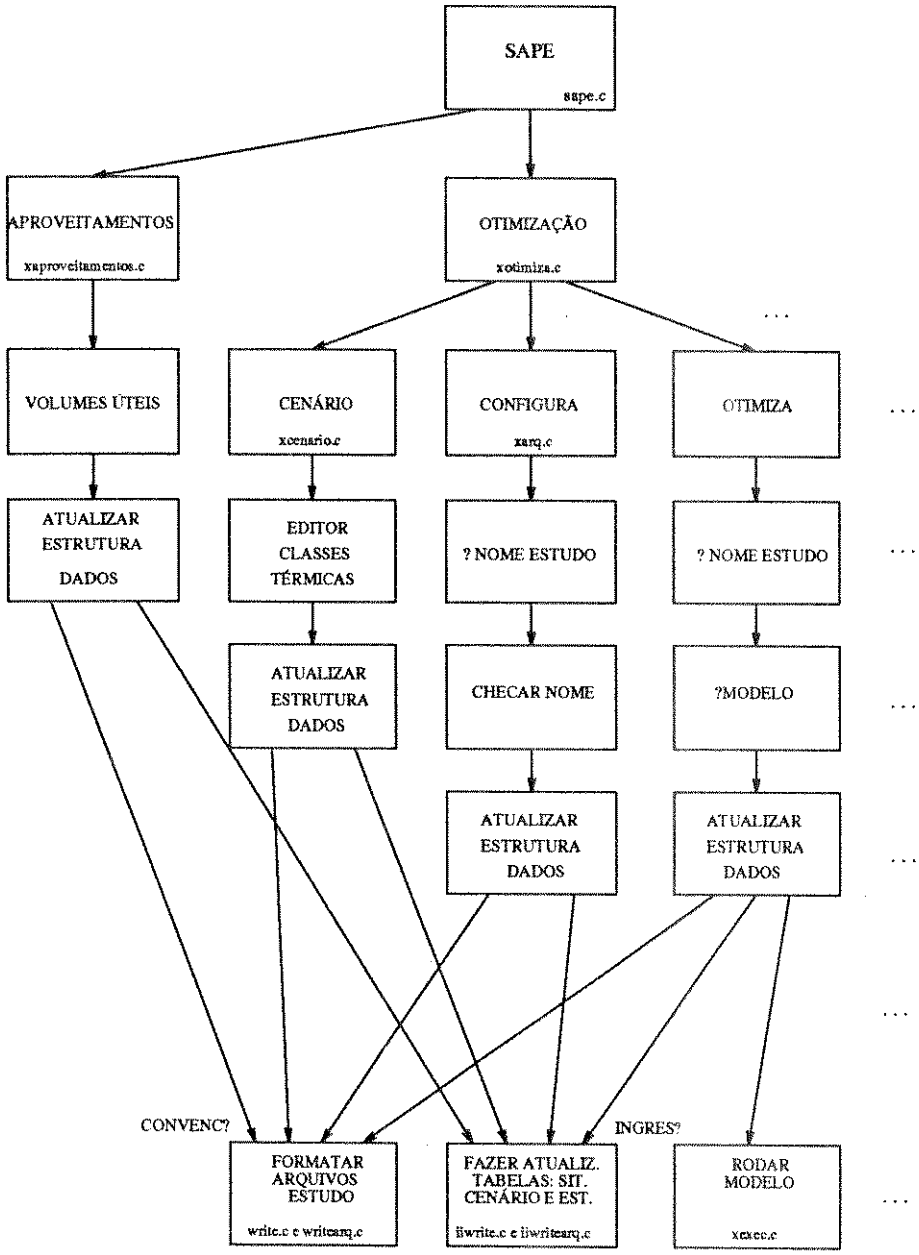

Figura 7.1: DHF Aproveitamentos e Otimização;

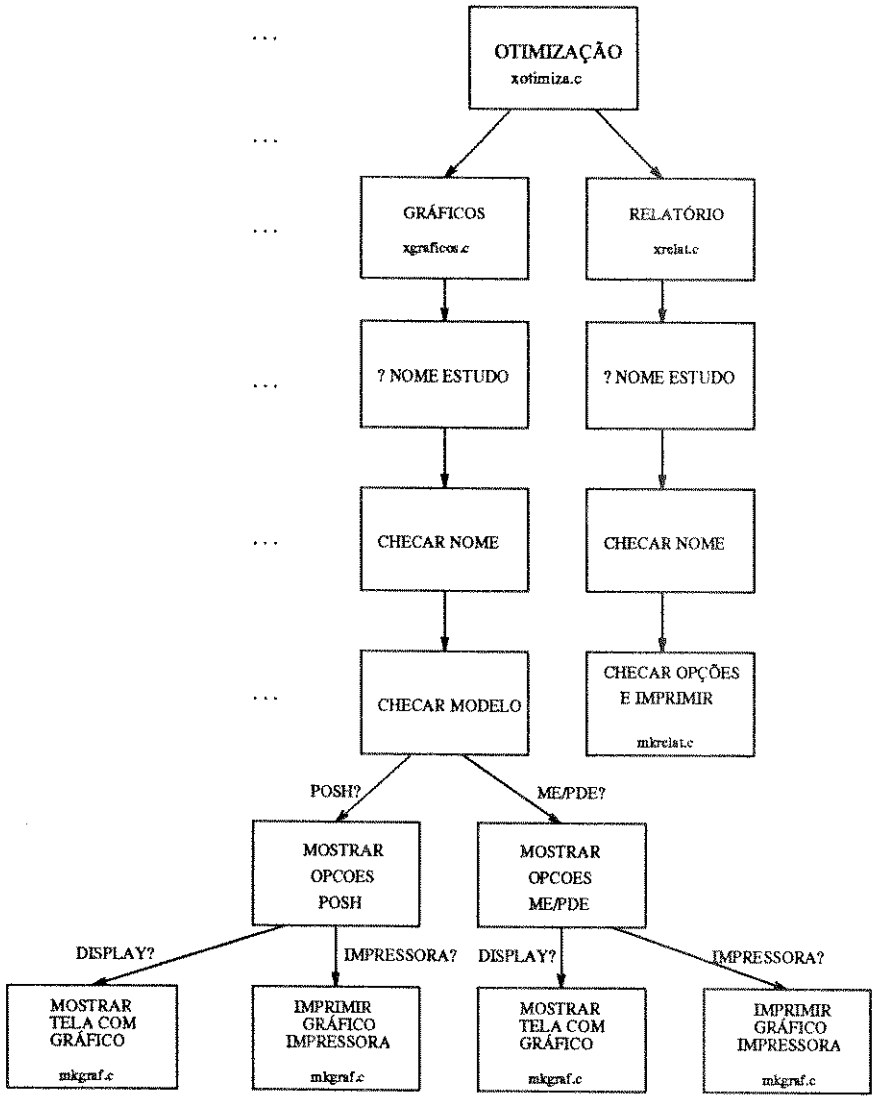

Figura 7.2: Continuação... DHF, Otimização;

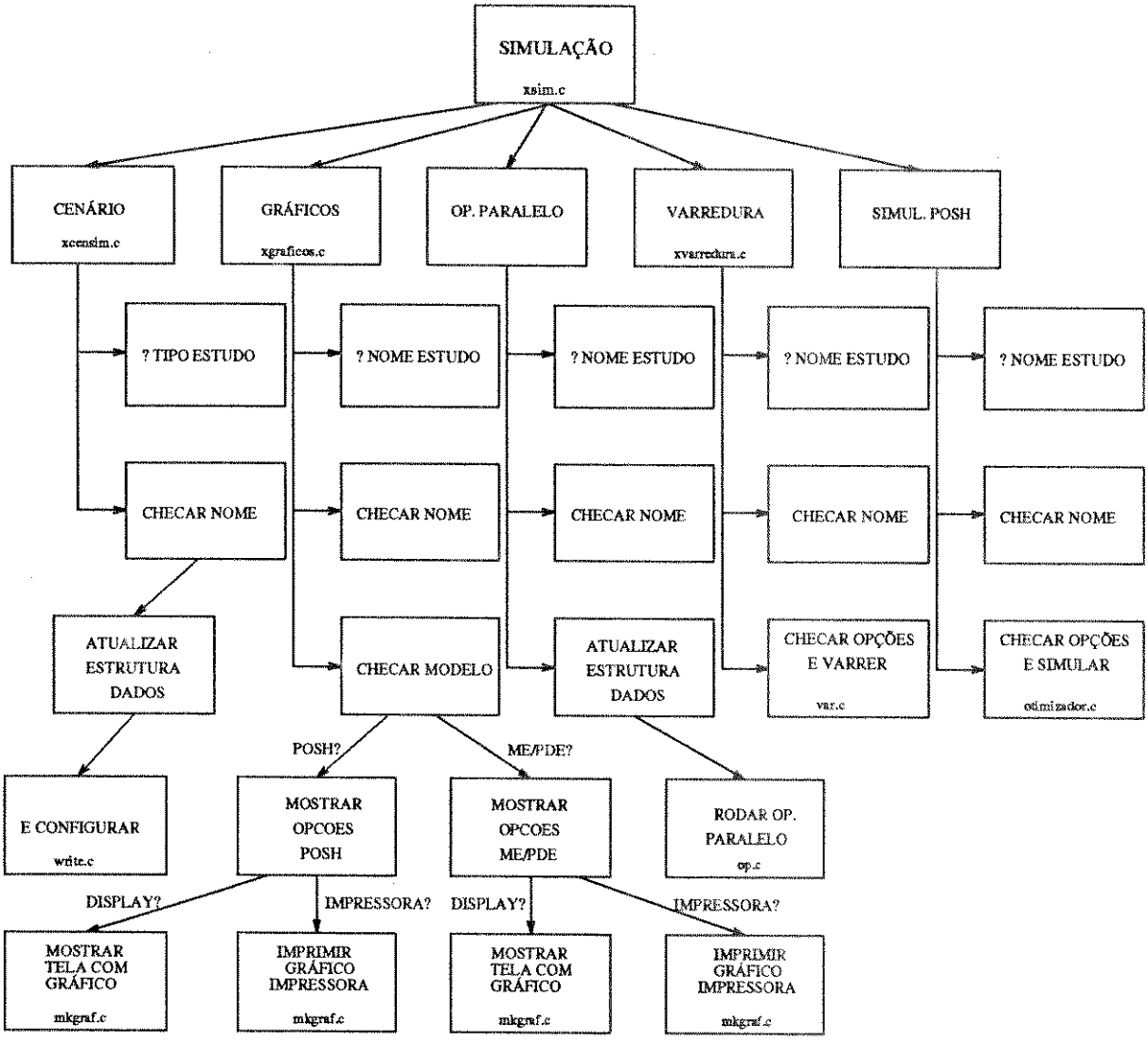

Figura 7.3: DHF Simulação;

Os módulos indicados estão localizados no diretório especificado pela variável de ambiente **$SAPEDIR**, definida durante a instalação. O diretório **$SAPEDIR/include** contém os *headers* necessários.

Os módulos iniciados com a letra x, estão relacionados com o **Gerenciamento de Interface**. Eles são responsáveis pela coordenação do relacionamento entre os objetos que compõem a interface. Os módulos iniciados com ii, concentram as rotinas específicas para comunicação com o Gerenciador de Banco de Dados Ingres, através de comandos SQL embutidos em linguagem C.

Os módulos **xaproveitamentosa.c** e **xaproveitamentosb.c** contém as rotinas para criação e manipulação dos objetos do *popup frame* **Aproveitamentos**. Constantes e funções estão definidas no módulo *header* **xaproveitamentos.h**.

Os módulos **xcenarios.c** e **xclasses.c** são responsáveis pela geração dos *popup frames* **Cenário** e **Editor de Classes**, respectivamente.

O módulo **xconfigura.c** (em versões mais antigas xarq.c), possui rotinas para configuração de estudos, conforme o que for especificado pelo usuário durante a seção. Ele se utiliza de rotinas de outros módulos: **write.c/iiwrite.c** e **read.c/iiread.c**, responsáveis pelo gerenciamento de dados. Tudo isso é feito com a utilização de uma estrutura de dados global intermediária que mantém os dados de configuração do estudo corrente na memória.

O módulo **xotimiza.c** contém as rotinas responsáveis pela criação do *popup frame* **Otimização**. Internamente ele se comunica com o módulo **read.c** para atualização das estruturas de dados com dados específicos de um determinado modelo. A tabela de estudos é atualizada. Os modelos são programas executáveis, invocados via *shell* do sistema operacional. Eles possuem diretórios específicos: **$SAPEDIR/[nome do modelo]**. A saída de resultados é direcionada para o diretório de resultados do usuário. Os dados são formatados de forma a serem posteriormente analisados (gráficos e relatórios). Julgou-se inconveniente armazenar os resultados da execução dos modelos no Banco de Dados, uma vez que a quantidade de dados gerada é muito grande.

O módulo **xgráficos.c** cuida da geração dos *popup frames* com opções de saídas gráficas, tanto para estudos de otimização quanto para estudos de simulação. Internamente ele se utiliza de rotinas do módulo **mkgraf.c** para geração das saídas gráficas na tela ou na

impressora, utilizando rotinas adaptadas do *software* GnuPlot.

O módulo **xrelat.c** possui rotinas para geração de um *popup frame* com opções de geração de relatório. A geração dos relatórios é feita por rotinas do módulo **mkrelat.c**.

O módulo **xvarredura.c** possui rotinas utilizadas na geração do *popup frame* dos cenários de varredura. A varredura por sua vez, é feita por um modelo do diretório **$SAPEDIR/VARREDURA**

O módulo **simulador.c** possui as rotinas do Simulador a Usinas Individualizadas. Por enquanto possui exclusivamente a opção para Simulações com o modelo Posh2.2.

A Operação em Paralelo é feita via um modelo constante do diretório **$SAPEDIR/OP**.

7.3 Estruturas de Dados

O programa mantém estruturas de dados globais (declaradas em **sape.h**) que são atualizadas durante a execução, dependendo da configuração feita pela usuário e do estudo carregado na memória.

Quando um estudo é configurado, os reservatórios escolhidos são setados *on* na estrutura *USINA* que, encadeada, fornece a lista de reservatórios disponíveis bem como dados específicos de configuração como os Volumes Iniciais e Finais para cada um deles. Existe um mapeamento das tabelas (ou arquivos) *SISTEMAS* e *MODELOS* do Banco de Dados para a estrutura. Somente um estudo é permitido de cada vez na memória.

Uma estrutura *CENÁRIOS*, encadeada, fornece uma lista dos cenários disponíveis para aquele estudo. Os parâmetros especificados são os mesmos da entidade *CENÁRIOS* do Dicionário de Dados, talvez outros se tornem necessários com o aperfeiçoamento dos modelos e a utilização de novos modelos.

Quando um modelo é solicitado, os dados necessários são acessados no Banco de Dados, baseados nos dados de configuração nas estruturas e gravados em arquivos necessários para a entrada de dados.

7.4 Parâmetros de Implementação

A seguir são enumeradas alguns parâmetros que podem ajudar a medir o nível de esforço envolvido na implementação do sistema. Todos foram medidos em máquinas Sun Sparc Classic de aproximadamente 55 MIPS.

Os códigos fonte do sistema ocupam 2592 Kbytes (aproximadamente 15000 linhas). Os programas executáveis possuem 664 kbytes e 1120 Kbytes, respectivamente o convencional e o que utiliza Ingres como Gerenciador de Banco de Dados.

Os tempos médios para se carregar os programas na memória são de 10s e 25s, respectivamente. É interessante observar que, quanto mais memória RAM houver (pelo menos 8 Mbytes) disponível, mais rápido o programa se torna.

O tempo médio de compilação e linkedição é de 3.5 minutos, utilizando a opção de *debugging* do compilador. Esse tempo aumenta para aproximadamente 4 minutos, com a utilização da opção de otimização de código que, no entanto, aumenta a performance de alguns módulos em até 20%.

O desenvolvimento do sistema consumiu aproximadamente 2.5 anos, incluindo o tempo gasto no estudo das metodologias de planejamento, no estudo de teoria de decisão e pesquisa das ferramentas utilizadas.

Capítulo 8

Conclusão

O presente trabalho se preocupou com a análise e o desenvolvimento de um sistema computacional que fornecesse suporte a decisão no planejamento a longo e médio prazos da operação de sistemas de energia elétrica. O elemento central em todo processo decisório é a informação de qualidade, obtida de forma rápida e interativa.

O aspecto principal do projeto portanto, foi a modelagem de toda a informação envolvida. Um modelo de dados foi desenvolvido, implementado e serviu como base para a construção do sistema, que é todo orientado para a informação. O Banco de Dados é o núcleo do sistema. Os outros aspectos (modelos e interface) são então vistos como processos que regulam o fluxo e a produção de informação.

Inicialmente a maior preocupação foi com a aquisição e a modelagem das informações utilizadas no planejamento e necessárias à representação das principais entidades que compõem um sistema de geração de energia elétrica (veja Capítulo 5, **Informações Básicas**). A aplicação que possibilita o acesso interativo às Informações Básicas ainda não foi concluída devido a problemas com o gerador de aplicações Windows4GL do Ingres. Entretanto, os dados podem ser manipulados via SQL.

A seguir, iniciou-se um período de avaliação das metodologias de planejamento e dos modelos utilizados. Procurou-se fazer uma análise voltada para as informações manipuladas durante os estudos e geradas pelos modelos durante a execução (**Informações de Estudos**). O bom andamento dessa fase resultou no sistema SAPE, onde os estudos podem ser feitos em um ambiente bastante confortável.

No SAPE, um **estudo** pode ser visto como uma relação entre um ou mais modelos, um sistema e determinadas configurações de cenários. Os estudos são configurados segundo a hierarquia *SISTEMAS / MODELOS / CENÁRIOS*, muito importante no trabalho com os modelos. Quando se executa um estudo com um modelo, essa informação fica armazenada na entidade *MODELOS*.

Outro tipo de estudo envolve uma **varredura** das séries de afluência, gerando múltiplos cenários hidrológicos. É possível obter então políticas mais representativas, que considerem diferentes aspectos hidrológicos (Regras de Operação de Reservatórios, por exemplo). Além disso, esses estudos permitem o levantamento de médias estatísticas das sucessivas otimizações.

Um Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas está em fase de testes e seu papel é implementar diferentes políticas de decisão obtidas com os diferentes estudos, ou estratégias de decisão sob diferentes cenários. O SAPE fornece um ambiente para a análise comparativa entre as estratégias a partir dos resultados obtidos com o simulador.

O sistema SAPE tem sido utilizado pelo pessoal do projeto temático FAPESP e de cursos de aperfeiçoamento da Eletrobrás (COSE), em diversos estudos ([12], [16], [17]), mostrando versatilidade e permitindo a consideração de novos aspectos do problema modelado.

Quanto à estratégia de Engenharia de Software (veja Capítulo 6) adotada, foram observadas algumas falhas, já previstas na literatura [9]. Após sucessivas versões o controle do projeto começa a "fugir das mãos do projetista", que reluta em abandonar a versão última do sistema, o que também não é vantagem para o cliente uma vez que o desenvolvimento de um novo projeto demanda muito tempo e esforço. Como resultado do *feedback* contínuo são feitas improvisações nem sempre muito elegantes que prejudicam o desempenho do sistema como um todo. Um futuro trabalho deve levar em consideração tais aspectos. A literatura da área recomenda que se inicie um novo projeto, abandonando o anterior.

Futuros trabalhos deverão considerar também a **modelagem de conhecimento**. Esse tipo de informação é muito importante para que o sistema seja utilizado dentro de uma estratégia de Planejamento Adaptativo. É necessário que se modele o conhecimento ou padrões levantados (as Regras de Operação de Reservatórios são um exemplo disso).

Tais padrões podem ser utilizados para aperfeiçoamento das metodologias, aumentando a qualidade das soluções e a eficiência na obtenção das mesmas, através da consideração de aspectos menos estruturados.

Apêndice A

Dicionário de Dados

Nesse apêndice, será mostrado um Dicionário de Dados para as principais entidades do Banco de Dados.

O Dicionário de Dados é uma ferramenta bastante útil, pois ele detalha todos os atributos de todas as entidades do modelo de dados.

A.0.1 Descrição das Entidades

HIDROELÉTRICAS

Essa tabela fornece as características do reservatório e da usina.

nomehid	varchar(12)	not null
codingres	integer	not null
codposto	integer	not null
sishid	integer	not null
codpostojus	integer	not null
empresa	integer	not null
codaprovdes	integer	not null
volmax	float4	not null
volmin	float4	not null
volvert	float4	not null
voldesv	float4	not null
cotamax	float4	not null
cotamin	float4	not null
pcva0	float4	not null
pcva1	float4	not null
pcva2	float4	not null
pcva3	float4	not null
pcva4	float4	not null
pcaa0	float4	not null
pcaa1	float4	not null
pcaa2	float4	not null
pcaa3	float4	not null
pcaa4	float4	not null
eva0	integer	not null
eva1	integer	not null
eva2	integer	not null
eva3	integer	not null
eva4	integer	not null
eva5	integer	not null
eva6	integer	not null
eva7	integer	not null
eva8	integer	not null
eva9	integer	not null
eva10	integer	not null
eva11	integer	not null
nconjmaq	integer	not null
npoljus	integer	not null
cotajus	float4	not null
inflcanal	integer	not null
pcfa0	float4	not null
pcfa1	float4	not null
pcfa2	float4	not null
pcfa3	float4	not null
pcfa4	float4	not null
ref	float4	not null
produtib	float4	not null
tipoper	integer	not null
coefperhid	float4	not null
fatcarmax	float4	not null
fatcarmin	float4	not null
vazminhis	float4	not null

Considerações Quanto aos Atributos

***nomehid**: Nome da hidroelétrica. É uma cadeia de caracteres de tamanho variável e de até 12 caracteres.

***codingres**: Código Ingres da hidroelétrica.

***codposto**: Código do posto, atribuído pela Eletrobrás.

sishid: Código do Sistema a que pertence a hidroelétrica. Isto é: Sudeste (1), Sul (2), Norte (3), Nordeste (4).

codpostojus: Código do posto a jusante.

empresa: Código da empresa. Isto é: Cemig, Cesp, etc.

codaprovdes: Código da usina que fica no aproveitamento de desvio.

volmax: Volume máximo da usina, segundo definido no Capítulo 2. Em hm^3.

volmin: Volume mínimo da usina, segundo definido no Capítulo 2. Em hm^3.

voldesv: Volume desviado pelo aproveitamento de desvio. Em hm^3.

cotamax: Cota máxima do reservatório, segundo definido no Capítulo 2. Em metros.

cotamin: Cota mínima do reservatório, segundo definido no Capítulo 2. Em metros.

pcva[0-4]: Coeficientes do Polinômio Cota x Volume do reservatório. É um polinômio do quinto grau.

pcaa[0-4]: Coeficientes do Polinômio Cota x Área do reservatório. É um polinômio do quinto grau.

eva[0-11]: Coeficientes de evaporação do reservatório. Em mm/mês.

nconjmaq: Número de conjuntos de máquinas da usina. A descrição dos atributos estão na tabela de **conjunto-maquinas** para efeito de normalização.

npoljus: Número de polinômios de jusante. Se houver mais de um, consultar tabela **pols_jus_extra**.

cotajus: Cota de jusante. Em metros.

inflcanal: 1-Vertimento influencia o canal de fuga. 0-Vertimento não influencia o canal de fuga.

pcfa[0-4]: Polinômio Vazão Defluente x Cota do Canal de Fuga. É um polinômio do quinto grau.

ref: Nível de referência do canal de fuga. Em relaçãoao nível do mar. Em metros.

produtib: Produtibilidade da usina. Em $MW/(m^3/s)m$

tipoper: Tipo de Perdas Hidráulicas. 1-%, 2-M e 3-K.

coefperhid: Coeficiente de Perdas Hidráulicas.

fatcarmin: Fator de Carga Mínimo.

fatcarmax: Fator de Carga Máximo.

vazminhis: Vazão mínima na série histórica. Em m^3/s.

CONJUNTO_MÁQUINAS

Essa tabela fornece as características das máquinas de um determinado conjunto de uma determinada usina.

codposto	integer	not null
nomehid	varchar(12)	not null
conjunto	integer	not null
tipo_turbina	integer	not null
num_maquinas	integer	not null
potencia_efet	float4	not null
queda_efet	float4	not null
engol_efet	float4	not null
pqhta0	float4	not null
pqhta1	float4	not null
pqhta2	float4	not null
pqhta3	float4	not null
pqhta4	float4	not null
pqhga0	float4	not null
pqhga1	float4	not null
pqhga2	float4	not null
pqhga3	float4	not null
pqhga4	float4	not null
phpta0	float4	not null
phpta1	float4	not null
phpta2	float4	not null
phpta3	float4	not null
phpta4	float4	not null

Considerações Quanto aos Atributos

***codposto**: Código do posto, atribuído pela Eletrobrás.

***nomehid**: Nome da hidroelétrica. É uma cadeia de caracteres de tamanho variável mas, com no máximo 12 caracteres.

***conjunto**: Número do conjunto. É um inteiro de 1 a **nconjmaqs**, atributo da entidade **hidroelétricas**.

tipo_turbina: É o tipo da turbina utilizada. 1-Francis, 2-Kaplan ou 3-Pelton.

num_máquinas: É o número de máquinas que o conjunto dado por **conjunto** possui.

potencia_efet: É a potência efetiva de cada máquina do conjunto em MW (ver Capítulo 2).

queda_efet: É a queda efetiva em metros (ver Capítulo 2).

engol_efet: É o engolimento efetivo de cada máquina do conjunto em m^3/s (ver Capítulo 2).

pqhta[0-4]: É o Polinômio Engolimento Máximo x Queda Líquida (Região da Turbina), de ordem cinco.

pqhga[0-4]: É o Polinômio Engolimento Máximo x Queda Líquida (Região do Gerador), de ordem cinco.

phpta[0-4]: É o Polinômio Potência Máxima x Queda Líquida, de ordem cinco.

VAZÕES_HISTÓRICAS

codposto	integer	not null
ano	integer	not null
jan	integer	not null
feb	integer	not null
mar	integer	not null
apr	integer	not null
may	integer	not null
jun	integer	not null
jul	integer	not null
aug	integer	not null
sep	integer	not null
oct	integer	not null
nov	integer	not null
dec	integer	not null

Considerações Quanto aos Atributos

***codposto**: Código do posto, conforme atribuído pela Eletrobrás.

***ano**: Ano do histórico de vazões. De 1931 a 1988. A Média de Longo Termo (MLT) é dada pelo último ano da série (1989).

***[mes]**: Mês (jan, feb, may, apr, jun, jul, aug, sep, oct, nov, dec) de um determinado **ano**, de um determinado posto (dado por **codposto**).

TERMOELÉTRICAS

codtermo	integer	not null
nometer	varchar(12)	not null
empresa	varchar(12)	not null
numund	integer	not null
combust	varchar(8)	not null
potefet	float4	not null
fatcapmax	float4	not null
fatcapmin	float4	not null
conspecfcmax	float4	not null
conspecfcmin	float4	not null

Considerações Quanto aos Atributos

***codtermo**: Código atribuído à usina térmica.

***nometer**: Nome da usina térmica. É uma cadeia de caracteres de tamanho variável mas, de no máximo 12 caracteres.

empresa: Nome da empresa que administra a usina térmica. É uma cadeia de caracteres variável mas, de no máximo 12 caracteres.

numund: Número de unidades de geração de uma determinada térmica.

combust: Tipo de combustível utilizado nas unidades de uma determinada usina térmica (DIESEL, OL.COMB., NUCLEAR, RASF, etc). É uma cadeia de tamanho variável mas, de no máximo 8 caracteres.

potefet: Potência efetiva de cada unidade geradora em MW.

fatcapmax: Fator de Capacidade Máxima.

fatcapmin: Fator de Capacidade Mínima.

conspecfcmax: Consumo Específico para o Fator de Carga Máximo.

conspecfcmin: Consumo Específico para o Fator de Carga Mínimo.

SISTEMAS

nome_estudo	varchar(12)	not null
nomehid	varchar(12)	null
volinicial	integer	null
volfinal	integer	null
nometermo	varchar(12)	null
resumo	varchar(35)	null

Considerações Quanto aos Atributos

***nome_estudo:** Nome do estudo configurado. Cadeia de caracteres variável com no máximo 12 caracteres.

nomehid: Nome da hidroelétrica configurada. Cadeia de caracteres variável com no máximo 12 caracteres.

volinicial: Volume inicial do reservatório configurado em porcentagem do volume útil.

volfinal: Volume final do reservatório configurado em porcentagem do volume útil.

nometermo: Nome da termoelétrica configurada. Cadeia de carateres variável com no máximo 12 caracteres.

resumo: Pequena descrição com no máximo 35 caracteres sobre o estudo configurado.

MODELOS

nome_estudo	varchar(12)	not null
modelo	varchar(12)	not null
resumo	varchar(35)	null

Considerações Quanto aos Atributos

***nome_estudo:** Nome do estudo configurado.

modelo: Nome do modelo utilizado no estudo.

Obs: Um estudo pode utilizar vários modelos.

resumo: Pequena observação com no máximo 35 caracteres.

CENÁRIO

codcenario	integer4	not null
codestudo	integer4	not null
nomesis	integer4	not null
tiposerievaz	varchar(9)	not null
anoinicial	integer4	not null
anofinalvar	integer4	null
horizonte	integer4	not null
mesinicial	integer4	not null
percmlt	integer4	null
tipodemanda	varchar(7)	not null
percpotinst	integer4	not null
taxadesconto	integer4	not null
nroclassesterm	integer4	not null

Considerações Quanto aos Atributos

***codcenario**: Código do cenário em que se rodará um determinado estudo. É gerado automaticamente, toda vez que se cria um novo cenário para o estudo na memória.

***nome_estudo**: Nome do estudo a que pertence um deteminado cenário.

tiposerievaz: Tipo da série de vazões utilizadas: histórica, sintética, MLT, etc.

anoinicial: Ano inicial do horizonte.

anofinalvar: Ano final de varredura;

horizonte: Horizonte de planejamento, em meses.

mesinicial: Mês inicial do ano inicial de planejamento.

percmlt: Percentagem da MLT.

tipodemanda: Tipo de Demanda utilizada: Sazonal e Flat.

percpotinst: A Demanda é calculada como uma percentagem da potência instalada.

taxadesconto: Taxa de Desconto utilizada.

nroclassesterm: Nro de classes térmicas.

Apêndice B

Formatação dos Arquivos SAPE

Os arquivos SAPE podem ser classificados em arquivos de entrada e saída de dados. Antes, porém é necessário que adotemos algumas convenções:

- *n*s para *n* espaços;
- i*n* para números inteiros de *n* dígitos;
- f*n.m* para números reais de *n* dígitos e *m* casas decimais;
- lf para *line-feed*;

B.1 Arquivos de Entrada de Dados

B.1.1 Diretório de Dados Principal

$SAPEDIR/dat/[entidade], onde estão os dados básicos das entidades: hidroelétricas, termoelétricas e vazões históricas.

A seguir é apresentado o arquivo principal com os dados básicos de **hidroelétricas**.

```
&###### 01/11/91 ### 11:30 ##################################################
&                              DADOS GERAIS
&-------------------------------------------------------------------------------
&       CODIGO      NOME              OPERACAO 0 - CRIA/ALTERA, 1 - EXCLUI
&        @@@        @@@@@@@@@@@@          @
COD        1        CAMARGOS              0
&-------------------------------------------------------------------------------
&
&       POSTOS VAZAO                                          APROV    APROV
&      VAZAOE     BDH      SISTEMA    EMPRESA    JUSANTE    DESVIO
&        @@@  @@@@@@@@        @          @@         @@@        @@@
DG1        1  61061080        1          18          2          0
&
&===============================================================================
&                              RESERVATORIO
&-------------------------------------------------------------------------------
&
&              V O L U M E S ( H M 3 )
&
&       MAXIMO    MINIMO   VERTEDOURO  DESVIO
&        @@@@@     @@@@@     @@@@@      @@@@@
VOL        792       120       419          0
&-------------------------------------------------------------------------------
&
&        C O T A S  ( M )
&
&        MAXIMA    MINIMA
&        @@@.@@    @@@.@@
COT      913.00    899.00
&-------------------------------------------------------------------------------
&
&       POLINOMIO VOLUME X COTA   ( COTA = F(VOLUME) )
&
&         A0            A1            A2            A3            A4
PCV  8.92970E+02   6.20890E-02  -1.10410E-04   1.24700E-07  -5.55120E-11
&-------------------------------------------------------------------------------
&
&       POLINOMIO COTA X AREA     ( AREA = F(COTA) )
&
&         A0            A1            A2            A3            A4
PCA  1.33343E+04  -3.28661E+01   2.00893E-02   0.00000E+00   0.00000E+00
&-------------------------------------------------------------------------------
&
&       COEFICIENTES DE EVAPORACAO ( MM / MES )
&
&   @@@@ @@@@ @@@@ @@@@ @@@@ @@@@ @@@@ @@@@ @@@@ @@@@ @@@@ @@@@
EVA    0    0    0   60   60   60   60   60   60   60    0    0


&
&===============================================================================
&                          CONJUNTO TURBINA / GERADOR
&-------------------------------------------------------------------------------
&
&                          REPRESENTACAO                      1- FRANCIS
&     NUMERO                 DO CONJUNTO          TIPO       2- KAPLAN / PROP.
&     DE CONJ           1- DETAL. 2- SIMPL.     TURBINA     3- PELTON
&     MAQUINAS                  @                  @
REP       1                     1                  2
&-------------------------------------------------------------------------------
&     CADA CONJUNTO DEVE TER, OBRIGATORIAMENTE UM CARTAO DO TIPO "MAQ",
&     QUE CONTEM AS CARACTERISTICAS DAS MAQUINAS DO CONJUNTO.
&
&     CASO A REPRESENTACAO SEJA DETALHADA, O CARTAO 'MAQ' DEVE VIR
&     ACOMPANHADO PELOS CARTOES 'QHT', 'QHG' E 'HPT' DOS POLINOMIOS
&     QUE REPRESENTAM A OPERACAO DO CONJUNTO TURBINA-GERADOR
&
&  MAQ _ CARACTERISTICAS DAS MAQUINAS DO CONJUNTO
&  QHT _ ENGOLIMENTO MAXIMO X QUEDA LIQUIDA ( REGIAO DA TURBINA )
&  QHG _ ENGOLIMENTO MAXIMO X QUEDA LIQUIDA ( REGIAO DO GERADOR )
&  HPT _ POTENCIA MAXIMA X QUEDA LIQUIDA
&
&      NUMERO      POT EF        QUEDA EF      ENGOL. EF
&     MAQUINAS     ( MW )         ( M )        ( M3/S )
&        @@          @@@@.@        @@@.@@         @@@@@
&MAQ
&                          COEFICIENTES DOS POLINOMIOS
&         A0            A1            A2            A3            A4
&QHT
&QHG
&HPT
&
MAQ        2          24.0          24.60          114
QHT -2.83182E+02   7.87319E+01  -6.05894E+00   2.08594E-01  -2.67102E-03
QHG  1.54591E+03  -1.56474E+02   5.80669E+00  -7.36364E-02   0.00000E+00
HPT -8.26319E+00   1.72390E+00  -3.82525E-02   1.27213E-03  -1.61870E-05
```

```
&
&=============================================================================
&                                U S I N A
&-----------------------------------------------------------------------------
&    APOS O CARTAO "JUS", DEVEM EXISTIR TANTOS CARTOES "PCF + REF"
&    QUANTOS FOREM OS POLINOMIOS DE JUSANTE DECLARADOS NO CARTAO "JUS"
&
&    NUMERO DE          COTA DE                 O VERTIMENTO
&    POLINOMIOS         JUSANTE                 INFLUENCIA O    1- SIM
&    DE JUSANTE        MEDIA (M)                CANAL DE FUGA ? 0- NAO
&        @              @@@.@@                       @
JUS      1              886.10                       0
&
&       VAZAO DEFLUENTE X COTA DO CANAL DE FUGA
&         A0            A1            A2            A3            A4
&PCF +1.23456E+12  +0.00000E+00  +0.00000E+00  +0.00000E+00 +0.00000E+00
&
&       REFERENCIA ( M )
&        @@@.@@
&REF
&
PCF  8.86100E+02   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00
REF        0.00
&
&-----------------------------------------------------------------------------
&
&     PRODUTIBILIDADE      TIPO  1- %
&       ESPECIFICA         PERDA 2- M          COEFICIENTE
&      ( MW/ M3/S )        HIDR. 3- K          PERDA HIDR.
&        @.@@@@@@            @                 @.@@@@ES@@
PPH      0.008525            1                 1.20000E+00
&-----------------------------------------------------------------------------
&
&       FATORES DE CARGA
&       MAXIMO    MINIMO
&        @@@.@     @@@.@
FCG      100.0       0.0
&-----------------------------------------------------------------------------
&
&          FATORES DE          VAZAO MIN      NUMERO
&      REDUCAO DE ENERGIA      HISTORICO     UNIDADES
&        TEIF %    IP %       ( M3/S )      DE  BASE
&        @@.@@     @@.@@         @@@@          @@
DG2       2.40      6.40           32           1
&-----------------------------------------------------------------------------
&
&       OBSERVACAO ( 48 CARACTERES )
&       @@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
OBS     19/06/89
&
&#############################################################################
```

A seguir é apresentado o arquivo principal com os dados básicos de **termoelétricas**.

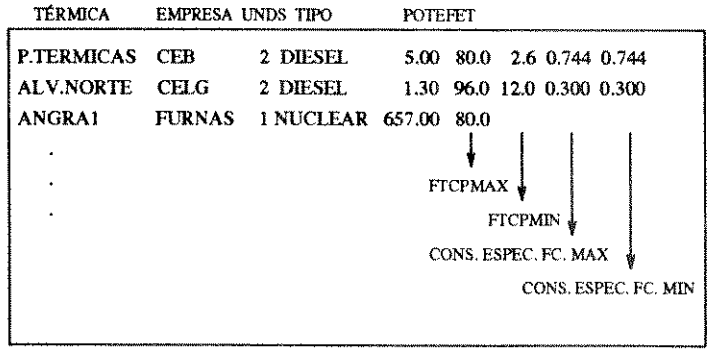

Figura B.1: Formatação Termoelétricas;

As **vazões históricas** estão organizadas em arquivos texto no diretório $SAPEDIR/dat/vazoes/[vazao.[codigo posto]] (**vazao.1** para Camargos, por exemplo). A seguir é apresentada a formatação para um arquivo de vazões típico.

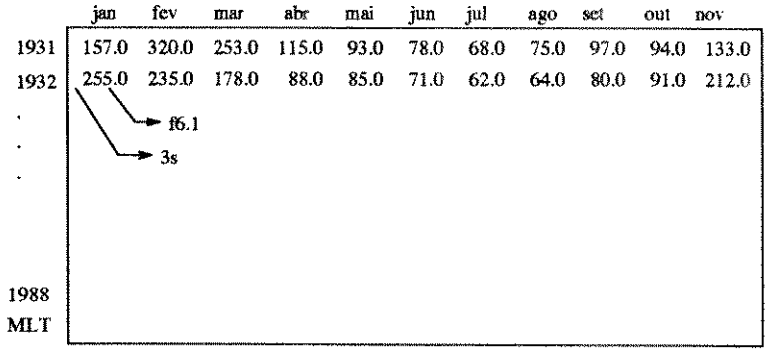

Figura B.2: Formatação Arquivos Vazão;

Um arquivo **default** é utilizado para definição da estratégia de otimização pelo POSH. Posteriormente, a escolha de estratégia poderá ser feita interativamente e este arquivo receberá outro nome.

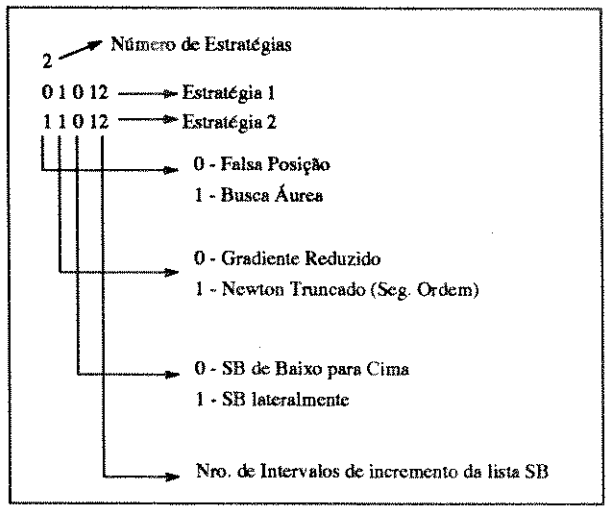

Figura B.3: Formatação Arquivo de Estratégias;

B.1.2 Diretório de Dados do Usuário

$HOMEDIR/sapedat/[estudo], onde estão os dados de configuração de um determinado estudo, necessários para rodar os modelos.

Os arquivos são:

x.*i*: Solução inicial (trajetória de volume) da usina *i*. Contém *horizonte* elementos no formato *f12.6*.

u.*i*: Série de vazões para a usina *i*. Contém *horizonte* elementos no formato *f12.6*. A série começa pelo **mês inicial** e **ano inicial**.

uh.*i*: Série de vazões históricas para a usina *i*. Contém *horizonte* elementos no formato *f12.6*. A série começa pelo **mês inicial** e **ano inicial**.

desctaxa: Contém a taxa de desconto adotada. A taxa *default* é 10% ao ano.
pcv: Contém os polinômios Cota x Volume para cada reservatório.

pcf: Contém os polinômios Vazão Defluente x Canal de Fuga para cada reservatório.

nmpcf: Contém o número de poliômios Vazão Defluente x Canal de Fuga para cada reservatório.

legenda: Contém o nome de cada usina, seu código, seu vetor jusante, sua turbinagem máxima. O mês inicial de planejamento e o ano inicial.

hmjus: Contém a altura de jusante média para cada reservatório.

hefet: Contém a altura efetiva para cada reservatório.

fo: Contém o número de classes térmicas, os coeficientes do custo marginal de cada uma das classes (a, b, c) e a capacidade de cada classe (veja Capítulo 3).

demanda: Contém a demanda calculada mês a mês (sazonal ou flat), baseada na potência instalada do sistema.

config: Contém o número de usinas do estudo configurado e o horizonte de planejamento.

canal: Contém os dados de canalização de cada usina.

B.1.3 Diretório de Resultados dos Modelos

$HOMEDIR/sapeout/[estudo], onde estão os dados de resultado dos modelos, referentes a um determinado estudo.

Para o POSH:

ea: Contém a variação da energia armazenada no sistema em função do tempo, para todo o horizonte de planejamento.

eaxv.*i*: Contém a variação da energia armazenada no sistema em função da variação do volume do reservatório i (em termos da porcentagem do volume útil).

gerhid: Contém a variação da geração hidráulica do sistema com o tempo.

naohid: Contém a variação da geração térmica do sistema com o tempo.

u%.*i*: Contém a trajetória ótima de defluência (em percentagem do volume útil) para o reservatório i, em função do tempo.

x%.*i*: Contém a trajetória ótima de volume (em percentagem do volume útil) para o reservatório *i*, em função do tempo.

u.*i*: Contém a trajetória ótima de defluência para o reservatório *i*, em função do tempo.

x.*i*: Contém a trajetória ótima de volume para o reservatório *i*, em função do tempo.

vma.*i*: Contém a trajetória de valor marginal da água para cada reservatório *i*, em função do tempo.

Para o MSE:

Saida: Contém todos os dados de saída do Sistema Equivalente (veja Capítulo 4): EAF(t), EC, etc.

Saida_Markov: Contém todos os dados de ajuste do Modelo Markoviano, inclusive as Matrizes de Probabilidade de Afluência;

tabelas: Tabelas de Decisão para a Geração Térmica Total e Tabelas de Custo Esperado Futuro de Operação, provenientes da PDE.

BIBLIOGRAFIA

[1] Simon, H.; **"The New Science of Management Decision"**; First Edition. New York: Harper&Row. 1960

[2] Anthony, R.N.; **"Planning and Control Systems: A Framework for Analysis"**, Harvard University, Graduate School of Business Administration, 1965

[3] Scott-Morton, M.S.; **"Management Decision Systems: Computer-Based Support for Decision-Making"**; Cambridge, MA: Division of Research, Harvard University, 1971

[4] Turban, E.; **"Decision Support and Expert Systems"**; MacMillan International Editions, Third Edition, 1993

[5] Sprague, R.H.; Watson, H.J.; **"Sistema de Apoio à Decisão: Colocando a Teoria em Prática"**; Editora Campus, 1991

[6] Mitra, G.; Editor; **"Computer Assisted Decision Making"**; North-Holland; 1986

[7] Bonczeck, R.H.; **"Foundations of Decision Support Systems"**; Academic Press: New York; 1981

[8] Kendall, K.E.; Kendall, J.E.; **"Systems Analysis and Design"**; Prentice Hall, 1988

[9] Pressman, R.S.; **"Software Engineering: a practitioner's approach"**; McGraw-Hill International Editions, Third Edition, 1992

[10] Lasdon, L.; **"Optimization and Decision Support, in Mathematical Models for Decision Support"**; Gautan Mitra, Editor; Nato Series, vol. 48, Springer Verlag, New York, 1988

[11] Saxena, P. et Ali **"Information-Oriented Architecture Adds New Flavor to Optimal Power Flow"**; *IEEE Computer Applications In Power.* Abr/91

[12] Oliveira, G.; Soares, S.; **"Otimização da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos com Representação Individualizada das Usinas e Afluências Determinísticas"**; Tese de Mestrado; FEE/UNICAMP; Agosto 1993

[13] Soares, S. e outros; **"Regras de Operação de Reservatórios para Otimização da Operação Energética de Sistemas Hidroelétricos"**; X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos; Gramado, RS; Nov. 1993

[14] Soares, S. & Carneiro, A. **"Reservoir Operation Rules for Hydroelectric Power System Optimization**, Joint International Power Conference: Athenas Power Tech, IEEE / NTUA, Athenas Greece, setembro, 1993

[15] Ribeiro, V; Soares, S.; **"Implementação em Linguagem C do Programa para Otimização de Sistemas Hidrotérmicos"**; Relat. Fapesp; Proc: 914155-8; Set. 1991

[16] Cruz Jr., G.; Soares, S.; **"Planejamento da Operação Energética a Longo Prazo de Sistemas Hidrotérmicos de Potência"**; Tese de Mestrado; FEE/UNICAMP; Fev. 1994

[17] Ferreira, R.F.; Soares, S.; **"Relatório Fapesp"**; Relat. Fapesp Mestrado; Proc:93/1745-4; Jan. 1994

[18] Miller, B.; **"Development of Enhanced Tools for Integrated Analysis of Reservoir and Power Systems Operations"**; National Conference of Hydraulic Engineering; San Francisco, CA; July 1993

[19] Soares, S. e outros; **"Planejamento da Operação de Sistemas de Energia Elétrica com Predominância em Geração Hidroelétrica"**; Proc. Fapesp 903611-7

[20] Fortunato, L.A e outros; **"Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica"**; Eduff; Niterói, RJ; 1990

[21] Kligerman, A.S.; **"Operação Ótima de Sistemas Hidrotérmicos Interligados Utilizando Programação Estocástica Dual"**; Tese de Mestrado; FEE/Unicamp; 1992

[22] Soares, S.; **"Planejamento da Operação De Sistemas Hidrotérmicos"**; SBA: Controle e Automação; Vol. 1 No. 2; pp. 12-31

[23] Centro de Pesquisa de Energia Elétrica; **"Modelo de Séries Hidrológicas"**; Manual de Metodologia; Relatório Técnico 113-81-A, 1983

[24] Grupo Coordenador para a Operação Interligada; **"Plano de Operação para 1993"**; Relatório SCEN-GTEN-S-SE; Rio de Janeiro, RJ

[25] SCEN-GTEH; **"Sistema Prevaz"**; Rio de Janeiro, RJ; Maio 1987

[26] SCEN-GTMC-GCOI; **"Cadastro Técnico de Usinas Hidráulicas"**; Rio de Janeiro, RJ; Novembro 1987

[27] Relational Technology Inc.; **"Ingres Manuals"**; Alameda, CA; Dezembro 1991

[28] **"Xview Manuals"**; O'Reilly & Associates, Inc.; 1992

[29] **"Xlib Manuals"**; O'Reilly & Associates, Inc.; 1992

[30] **"Matlab Manuals"**; The Math Works Inc.; 1993