

MODELO DE OPERAÇÃO ÓTIMA PARA A CASCATA DO RIO PARDO

Rosana Paiva Mota

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO
ELETRICISTA.

Aprovada por:

Profª. Carmen Lucia Tancredo Borges, D. Sc.
(Orientadora) – UFRJ

Leontina Pinto, D. Sc.
(Co-Orientadora) – Engenho

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.
UFRJ

Luiz Henrique Guimarães de Macêdo, D. Sc.
Engenho

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2010

“À minha querida tia Piedade (in memorian),
pelo exemplo de luta e determinação.”

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força nos momentos que o mais fácil seria desistir;

Aos meus pais Almir e Ana, pelo amor e apoio incondicional mesmo com a distância física;

Aos meus irmãos Raianny e Marcus Vinícius, pelo companheirismo;

Ao meu namorado e amigo Rafael, pelo carinho, amor e paciência nos momentos difíceis;

A minha segunda família: Manoel, Zenaide, Zenilson, Zelaine, Luciane, Caio e Rafael, pelo apoio, ajuda e paciência durante todo esse período;

A Leontina, pela oportunidade de desenvolver esse trabalho, por todos os conhecimentos compartilhados durante esta etapa e, principalmente, pela paciência ao longo da elaboração do trabalho;

A Carmen, pela orientação;

Aos colegas da Engenho, em especial a Paula, Luiz e Francisco, pela paciência, ensinamentos e momentos compartilhados;

Aos colegas da graduação, em especial aos amigos Túlio, Cesar e Flavius, pelo companheirismo ao longo desta jornada e pelos momentos de descontração;

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRJ, pelos momentos compartilhados e toda a ajuda ao longo desta caminhada;

As minhas queridas amigas Isabela, Thamyris e Greici, pelos valiosos conselhos nos momentos difíceis;

Ao professor do ensino médio Sérgio, por ter me apoiado e dado conselhos no momento que eu precisava decidir sobre minha vida profissional.

"Jamais considere seus estudos como uma obrigação,
mas sim como uma oportunidade invejável para aprender sobre
a influência libertadora da beleza do reino do espírito,
para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade
à qual pertencerá o seu trabalho futuro."

Albert Einstein

Resumo do Projeto Final em Engenharia Elétrica apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica – UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista:

MODELO DE OPERAÇÃO ÓTIMA PARA A CASCATA DO RIO PARDO

Rosana Paiva Mota

Dezembro de 2010

Orientadores: Carmen Lucia Tancredo Borges

Leontina Pinto

No Brasil, as fontes mais usadas para a geração elétrica são as usinas hidrelétricas e as usinas térmicas. O sistema elétrico brasileiro possui uma série de particularidades. O alto grau de incertezas e a dimensão das cascatas são algumas das características que dificultam o problema do Planejamento da Operação desse sistema.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático e um sistema computacional para a operação otimizada da cascata do rio Pardo, em projeto conjunto com a AES Tietê. Serão consideradas as restrições físicas da cascata e as paradas para manutenção preventiva das máquinas. Outras restrições, como a prevenção para cheias ou níveis mínimos de vazão (irrigação, meio ambiente) poderão ser implementadas, se consideradas relevantes.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objetivo do trabalho	4
1.3 Organização do trabalho	4
CAPÍTULO 2.....	6
2 PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS	6
2.1 Considerações iniciais.....	6
2.2 Usinas Termelétricas.....	7
2.3 Usinas Hidrelétricas.....	7
2.4 Etapas para o Planejamento de Sistemas Elétricos	11
2.5 O Planejamento da Operação.....	12
2.6 Cadeia para o Planejamento da Operação.....	19
2.6.1 Planejamento a Longo Prazo.....	19
2.6.2 Planejamento a Médio Prazo.....	20
2.6.3 Planejamento a Curto Prazo	21
CAPÍTULO 3.....	22
3 A CASCATA DO RIO PARDO: CARACTERÍSTICAS E MODELAGEM MATEMÁTICA	22
3.1 Considerações iniciais.....	22
3.2 Descrição da cascata do rio Pardo	23
3.3 Variáveis envolvidas na descrição do problema.....	26
3.4 A modelagem matemática da cascata do rio Pardo.....	27

3.4.1	A função objetivo.....	28
3.4.2	As restrições operativas.....	30
3.4.2.1	Balanço hídrico.....	30
3.4.2.2	Defluência	31
3.4.2.3	Demandas.....	32
3.4.2.4	Limitações físicas dos equipamentos disponíveis	32
3.4.3	A formulação matemática final para a cascata do rio Pardo	35
CAPÍTULO 4.....	39	
4	A IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DA CASCATA DO RIO PARDO.....	39
4.1	Considerações iniciais.....	39
4.2	Descrição do problema	39
4.3	Implementação do problema de otimização	40
4.4	Estudo de Caso.....	54
CAPÍTULO 5.....	57	
5	CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59	
APÊNDICE A	63	
DIAGRAMA DAS USINAS HIDRELÉTRICAS DO SIN	63	
APÊNDICE B	64	
DADOS DAS USINAS DA CACATA DO RIO PARDO	64	
B.1.	Caconde	64
B.2.	Euclides da Cunha	65
B.3.	Limoeiro	65
APÊNDICE C	67	

<i>WHAT'SBEST!</i>	67
C.1. Considerações iniciais.....	67
C.2. Visão geral da instalação do What'sBest.....	67
C.3. Tipos de modelo.....	69
C.3.1. Modelos otimizáveis.....	69
C.3.2. Modelos não- otimizáveis.....	69
C.3.3 Modelos com restrições inteiras	69
C.4. Os passos principais para a solução de um problema	70

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1.1: Crescimento do Consumo Nacional de Energia Elétrica ao longo do tempo [3].	2
Figura 1.2: Capacidade Instalada do SIN no final de 2009 [4].	3
Figura 2.1: Diagrama esquemático da composição de um sistema elétrico.	6
Figura 2.2: Cadeia energética de uma usina hidrelétrica [2].	8
Figura 2.3: Usina hidrelétrica [5].	10
Figura 2.4: Corte transversal de uma usina hidrelétrica [5].	10
Figura 2.5: Diagrama esquemático com as consequências operativas na operação de um sistema hidrotérmico [2].....	13
Figura 2.6: Esquema simplificado de uma usina hidrelétrica [2].....	16
Figura 2.7: Esquema simplificado de três usinas hidrelétricas em cascata [2].....	16
Figura 2.8: Representação esquemática de uma usina hidrelétrica para estudos energéticos.	18
Figura 2.9: Representação esquemática da Cadeia de Planejamento.	21
Figura 3.1: Usina hidrelétrica Caconde [11].	24
Figura 3.2: Usina hidrelétrica Euclides da Cunha [11].	24
Figura 3.3: Usina hidrelétrica Limoeiro [11].....	25
Figura 3.4: Disposição das usinas hidrelétricas existentes na cascata do rio Pardo.....	25
Figura 3.5: Subsistema hidrelétrico genérico.	28
Figura 4.1: Guia da usina Caconde com visualização para apenas 10 instantes de tempo.	44
Figura 4.2: Guia com a restrição de demanda com visualização para apenas 10 instantes de tempo e a função objetivo do problema.....	45

Figura 4.3: Guia WB! Status que exibe todo o status da otimização.....	46
Figura 4.4: Dados da solução otimizada para a usina Caconde.....	47
Figura 4.5: Dados da solução otimizada para a usina Euclides da Cunha.....	48
Figura 4.6: Dados da solução otimizada para a usina Limoeiro.....	49
Figura 4.7: Guia <i>Visualização de Resultados</i> para a visualização de dados relativos a um instante de tempo específico.....	50
Figura 4.8: Gráfico da energia turbinada versus tempo para as usinas da cascata do rio Pardo.....	51
Figura 4.9: Gráfico da energia vertida versus tempo para as usinas da cascata do rio Pardo.....	52
Figura 4.10: Gráfico da energia desviada versus tempo para as usinas da cascata do rio Pardo.....	52
Figura 4.11: Gráfico da energia armazenada versus tempo para as usinas da cascata do rio Pardo.	53
Figura 4.12: Gráfico da energia armazenada versus tempo para as usinas da cascata do rio Pardo utilizando os dados de entrada da Tabela 4.2.	56
Figura C.1: Visualização do menu e das barras de ferramentas do <i>What'sBest!</i> no Excel 2007.	68
Figura C.2: Identificação da barra de ferramenta do <i>What'sBest!</i> no Excel 2007.....	70
 Tabela 3.1: Dados importantes das usinas da cascata do rio Pardo.....	24
Tabela 4.1: Dados de entrada para o problema de otimização.	41
Tabela 4.2: Dados de entrada para o estudo de caso do problema de otimização.	54

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A energia elétrica tornou-se indispensável para a sobrevivência do ser humano, sendo utilizada para diversos fins, passando a ser recurso estratégico para praticamente toda a humanidade. O consumo de energia vem aumentando em todo o mundo, de acordo com o crescimento sócio-econômico da população. O crescimento acelerado da demanda deste recurso faz surgir a necessidade de investimentos englobando a geração, transmissão e distribuição da energia elétrica [1].

Atualmente, praticamente todo o desenvolvimento tecnológico de um país pressupõe a existência de energia elétrica como suprimento. Podem-se exemplificar os diversos equipamentos eletrônicos presentes nas residências, comércios, hospitais, escolas, e outros locais da sociedade, os quais são, em alguns casos, indispensáveis [2].

Entretanto, a energia elétrica não é uma energia primária, ou seja, ela não é encontrada na natureza pronta para o consumo, como é o caso do carvão, por exemplo. Assim, alguma fonte primária de energia deve ser usada para a geração de eletricidade. As mais comuns são as águas dos rios, o vapor de água, o gás natural, o vento, a energia solar, entre outras.

A Figura 1.1 ilustra o crescimento do consumo de energia elétrica no Brasil no período de 1995 até 2009 [3].

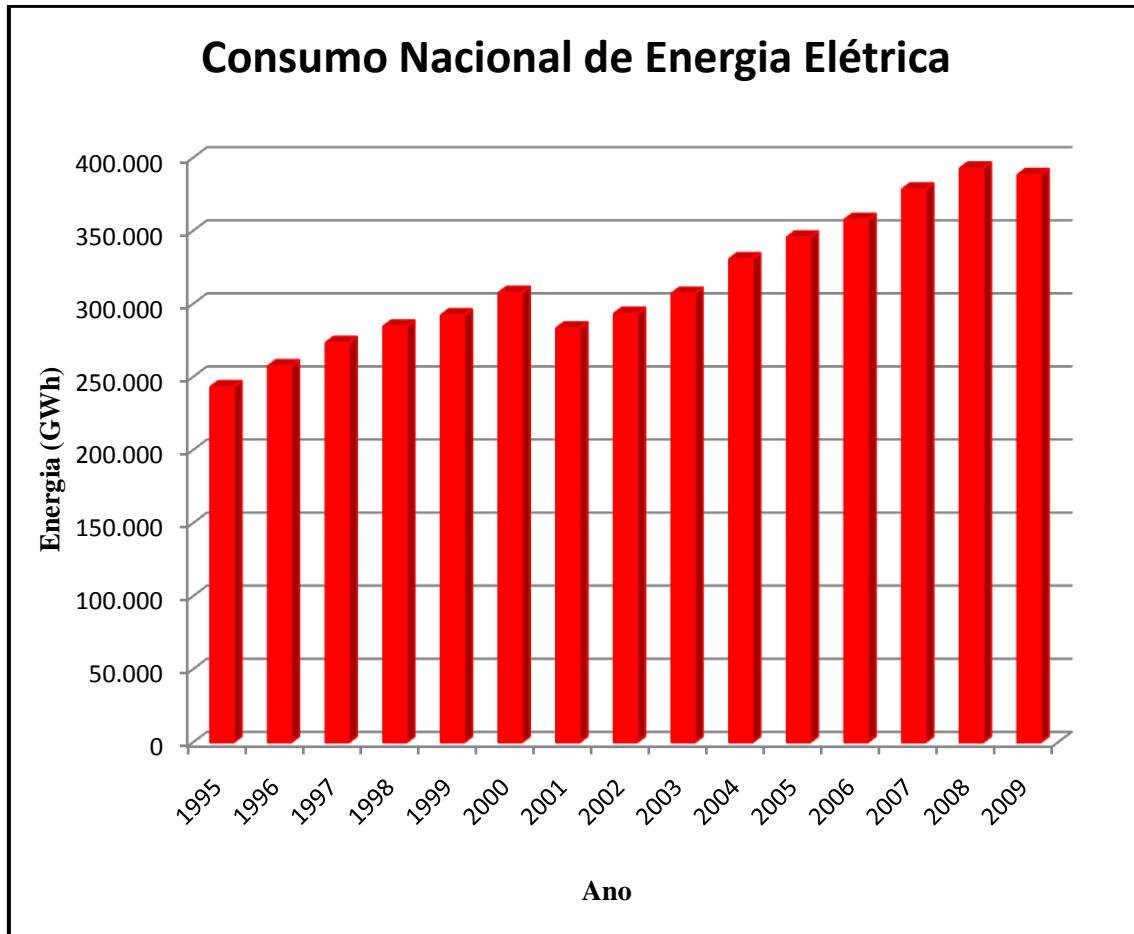


Figura 1.1: Crescimento do Consumo Nacional de Energia Elétrica ao longo do tempo [3].

No Brasil, a geração de energia elétrica é proveniente principalmente das usinas hidrelétricas. Pode-se citar também, o uso de usinas termelétricas, usinas nucleares e fontes alternativas para a geração de energia. Na Figura 1.2 está representada a capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional (SIN) no final de 2009, conforme dado em [4].

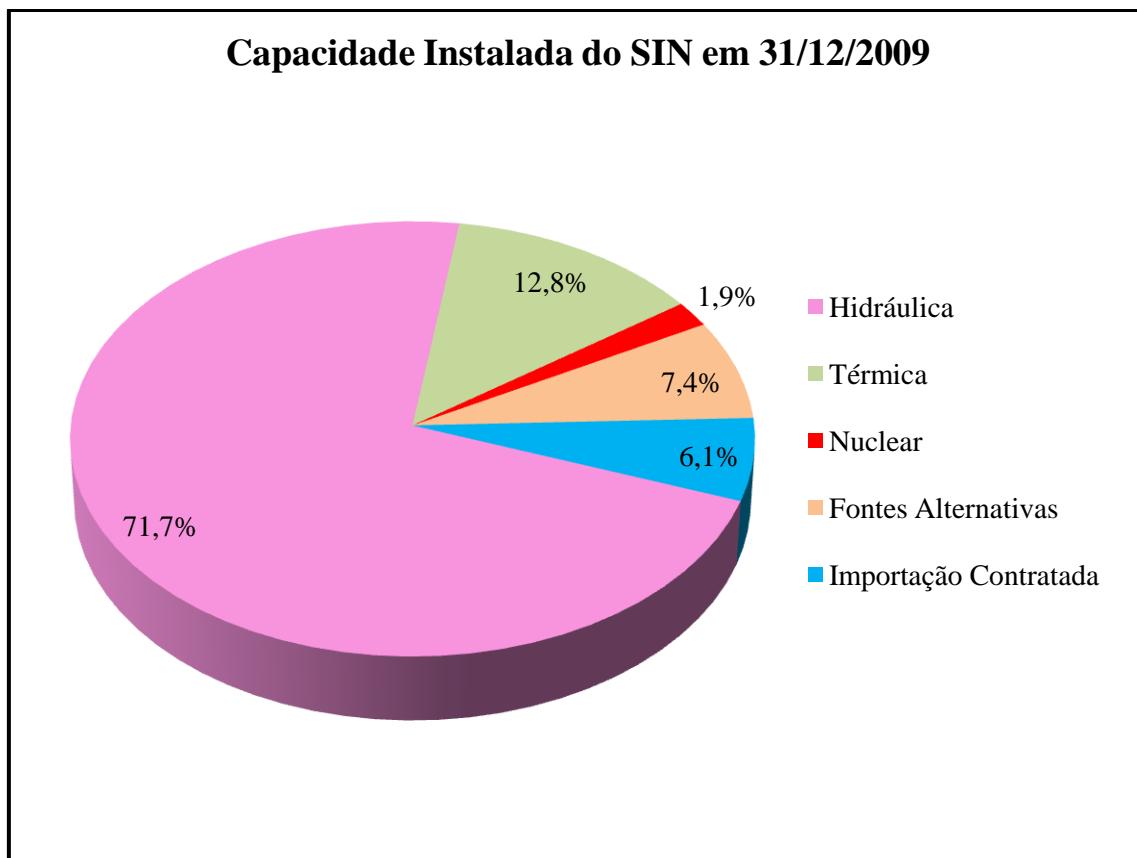


Figura 1.2: Capacidade Instalada do SIN no final de 2009 [4].

A expansão das fontes geradoras implica elevado custo financeiro e social. Sendo assim, é extremamente necessário o estudo de metodologias para o Planejamento da Operação de sistemas de energia elétrica que retirem o máximo de benefício das fontes geradoras existentes, de forma a obter uma operação econômica e confiável.

Em uma visão global do sistema de geração de energia elétrica no Brasil, os principais atores são as usinas hidrelétricas. Entretanto, o volume de água afluente que chega aos reservatórios é desconhecido, pois depende basicamente das afluências que irão ocorrer no futuro. Além disso, a disponibilidade de energia hidrelétrica é limitada pela capacidade de armazenamento nos reservatórios. Este problema introduz uma relação entre a decisão tomada no presente e a consequência futura desta decisão.

O sistema elétrico brasileiro possui uma série de particularidades. O alto grau de incertezas e a dimensão das cascatas são algumas das características que dificultam o problema do Planejamento da Operação desse sistema. No presente trabalho, será dada ênfase ao Planejamento da Operação Energética de uma pequena parte pertencente ao Sistema Interligado Nacional com a geração de energia elétrica predominante no Brasil, ou seja, a geração hidrelétrica.

1.2 Objetivo do trabalho

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático e um sistema computacional para a operação otimizada da cascata do rio Pardo, em projeto conjunto com a AES Tietê. Na otimização da cascata do rio Pardo devem ser obtidos os parâmetros energéticos ótimos para a sua operação em um determinado horizonte de estudo.

Para atingir tal objetivo, foi feita a modelagem matemática do sistema, considerando todas as restrições relevantes para o problema.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

- O Capítulo 2, "*Planejamento de Sistemas Elétricos*", faz uma breve revisão dos aspectos teóricos para o planejamento de sistemas de energia elétrica,

enfatizando as características do planejamento da operação energética, passando pelas características das usinas existentes, enfatizando as características de uma usina hidrelétrica;

- O Capítulo 3, “*A Cascata do rio Pardo: Características e Modelagem Matemática*”, apresenta toda a modelagem matemática para a cascata do rio Pardo, explicando cada restrição relevante utilizada para solucionar o problema;
- O Capítulo 4, “*A Implementação do Modelo da Cascata do rio Pardo*”, apresenta a metodologia utilizada para a implementação do modelo através do uso do otimizador *What'sBest!*, apresentando um estudo de caso;
- O Capítulo 5, “*Conclusão*”, apresenta as conclusões obtidas;
- Em “*Referências Bibliográficas*” é possível encontrar a bibliografia utilizada no desenvolvimento do trabalho;
- O Apêndice A, “*Diagrama das Usinas Hidrelétricas do SIN*”, apresenta o diagrama esquemático contendo a disposição das usinas hidrelétricas do Sistema Interligado Nacional (SIN), de acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS);
- O Apêndice B, “*Dados das Usinas da Cascata do Rio Pardo*”, apresenta alguns dados construtivos das usinas pertencentes à cascata do rio Pardo (Caconde, Euclides da Cunha e Limoeiro), de acordo com a AES Tietê;
- O Apêndice C, “*What'sBest!?*”, apresenta uma breve descrição para a utilização do otimizador *What'sBest!*, de acordo com o Help do otimizador.

CAPÍTULO 2

2 PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

2.1 Considerações iniciais

No Brasil, a maior parte da geração de energia elétrica é feita através das usinas hidrelétricas, sendo complementadas por outros tipos de geração. Com isso, o sistema elétrico é constituído principalmente de usinas hidrelétricas, geração complementar (que pode ser termelétricas, nuclear, fontes alternativas, etc) e uma rede de transmissão interligando as usinas geradoras aos centros consumidores, conforme mostrado no diagrama esquemático da Figura 2.1.

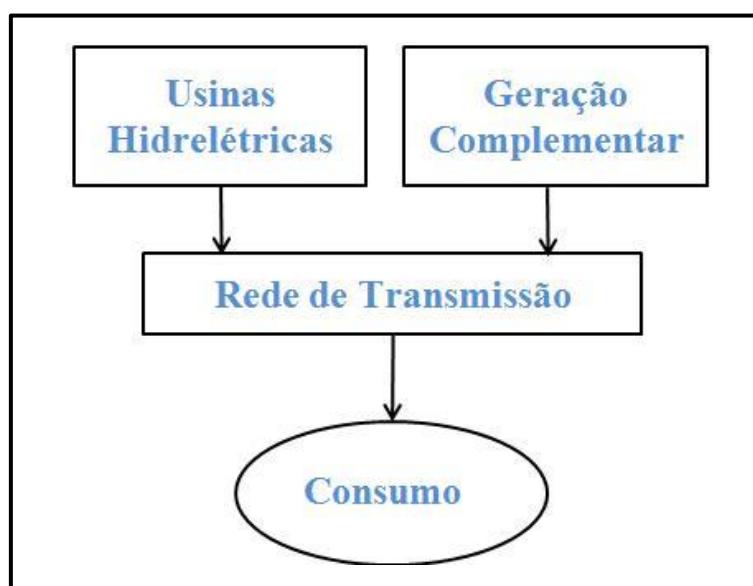


Figura 2.1: Diagrama esquemático da composição de um sistema elétrico.

Este capítulo apresentará os conceitos da principal fonte de geração de energia elétrica usada no Brasil, a geração hidrelétrica e os conceitos principais do planejamento de sistemas elétricos, focalizando principalmente o planejamento da operação de curto prazo de um sistema hidrelétrico.

2.2 Usinas Termelétricas

As usinas termelétricas representam uma parcela da geração complementar. A energia elétrica de uma usina termelétrica resulta da transformação da energia cinética de gases e vapores em expansão, aquecido pela queima de combustíveis [5-6]. As usinas termelétricas podem ser divididas em dois grupos importantes: as termelétricas convencionais, que utilizam combustíveis fósseis e as termelétricas nucleares, que utilizam combustíveis físseis.

Qualquer tipo de usina termelétrica é representado nos estudos de planejamento através das suas características físicas e restrições operativas, tais como: potência máxima, combustível usado, consumo específico, taxa de tomada de carga e nível mínimo operativo.

As usinas termelétricas não fazem parte do escopo principal deste trabalho. Mais informações acerca deste tema podem ser encontradas em [5-6].

2.3 Usinas Hidrelétricas

A energia elétrica de uma usina hidrelétrica é obtida através da transformação da energia potencial da água armazenada no reservatório em energia elétrica. Basicamente, seu princípio de funcionamento consiste no fato de que, uma vez captada, a água deve ser conduzida por dutos até uma turbina, que possui um eixo solidário a um gerador elétrico. Uma vez que a água movimenta esta turbina, gira-se o rotor do gerador, induzindo uma corrente elétrica em seu estator [2]. Desta forma, obtém-se uma conversão energética que pode ser esquematizada como exposto na Figura 2.2.

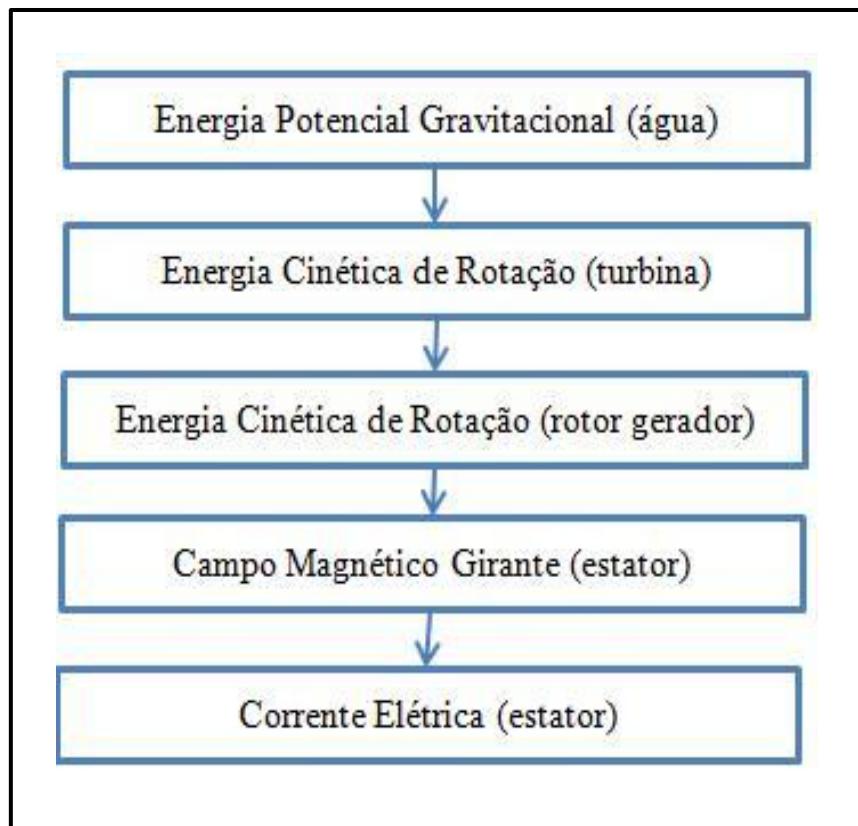


Figura 2.2: Cadeia energética de uma usina hidrelétrica [2].

A implantação de uma usina hidrelétrica consiste numa obra de engenharia de grande porte, pois o tempo de construção é longo e o investimento econômico é muito alto. Entretanto, apesar do alto custo, há uma grande predominância no uso da energia

hidrelétrica no Brasil devido à privilegiada hidrologia brasileira. Essa característica torna a geração de energia elétrica no Brasil bastante econômica, já que as usinas hidrelétricas utilizam água como combustível. Porém, exige um planejamento maior na expansão, devido às usinas hidrelétricas demandarem um maior tempo para a construção, e na operação, pois diversas restrições dos reservatórios e dos rios devem ser obedecidas. No Brasil existem diversas Pequenas Centrais Hidrelétricas, as chamadas PCH's, que são usinas hidrelétricas de até 30 MW, as quais não necessitam de investimentos tão grandes e demandam menor tempo de construção, além de causar um impacto ambiental bem menor. As PCH's são incentivadas atualmente.

Outro aspecto importante das usinas hidrelétricas é a sua longevidade. Usinas deste tipo podem durar mais de um século, ao contrário das termelétricas que esgotam sua vida útil em cerca de 30 anos [7]. Com esta grande expectativa de vida, terminado o tempo de investimento, a usina continuará gerando energia com custos reduzidos e com enormes benefícios a sociedade, além da recuperação de todo o dinheiro empregado na construção da usina.

As usinas hidrelétricas são compostas basicamente por: barragem, reservatório, casa de força e vertedouro. A barragem é formadora de um reservatório que represa um curso d'água. A casa de força é o local onde estão instalados os grupos turbina-gerador e outros equipamentos auxiliares. O vertedouro permite a liberação de água diretamente sem passagem pela casa de força, ou seja, ele descarrega toda a água que excede a capacidade do reservatório e não é utilizada para a geração [6]. A Figura 2.3 mostra uma usina hidrelétrica. A Figura 2.4 mostra o corte transversal de uma usina hidrelétrica.



Figura 2.3: Usina hidrelétrica [5].

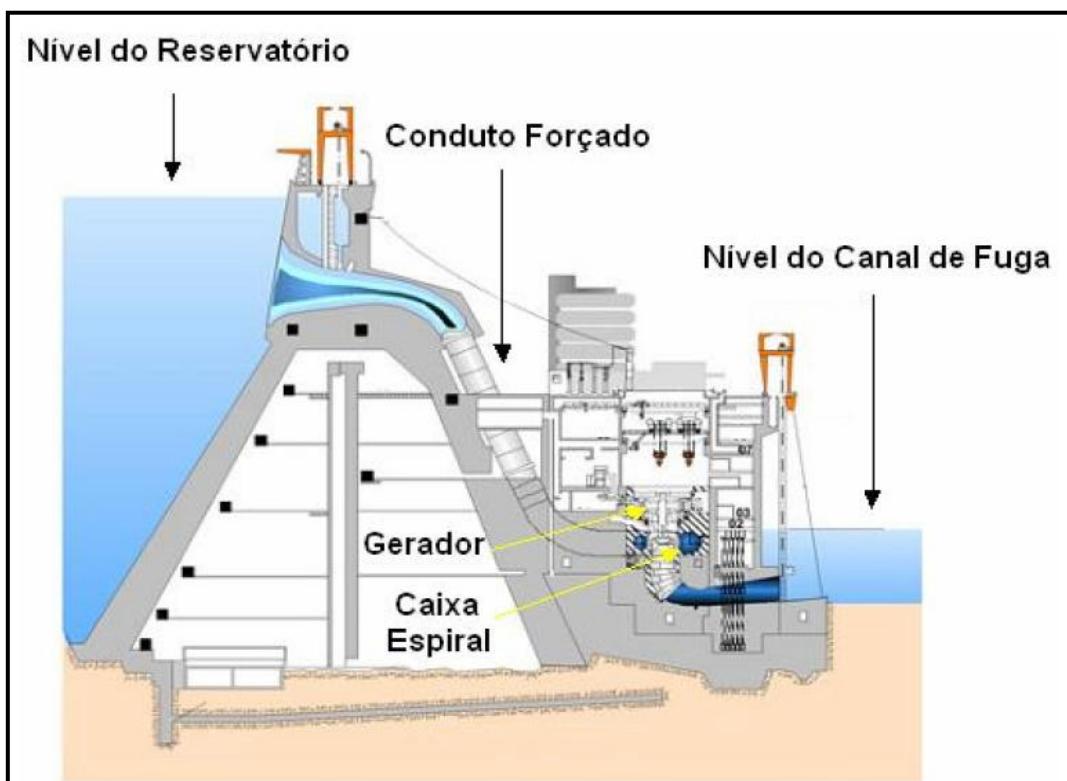


Figura 2.4: Corte transversal de uma usina hidrelétrica [5].

Os reservatórios, dependendo da sua capacidade de regularização, podem ser classificados em dois grupos: de compensação e de acumulação. Os reservatórios de compensação possuem volume suficiente somente para a regularização de descargas semanais ou diárias. As usinas com esse tipo de reservatório são chamadas de usinas hidrelétricas a fio d'água. Os reservatórios de acumulação são maiores em tamanho e tem capacidade de regularizar as vazões de um mês, um ano ou até mesmo de vários anos. Os reservatórios de acumulação anual ou plurianual atenuam bastante o efeito da variabilidade das afluências naturais, devido ao armazenamento em períodos úmidos e deplecionamento em períodos secos.

Maiores informações sobre as usinas hidrelétricas em [3,5-7].

2.4 Etapas para o Planejamento de Sistemas Elétricos

Em geral, o planejamento do setor elétrico é composto por duas fases: Planejamento da Expansão e Planejamento da Operação.

O Planejamento da Expansão é a etapa na qual se procura analisar as diferentes estratégias da expansão do sistema elétrico em relação à geração e a transmissão, estabelecendo-se um programa de construção e instalação de novas unidades. Esta fase contempla normalmente um horizonte de 30 anos.

O Planejamento da Operação é a etapa na qual se procura estabelecer o comportamento do sistema para um horizonte de operação de alguns anos à frente. Nesta etapa deve-se promover o aproveitamento racional dos recursos, garantindo-se a

qualidade e segurança no atendimento à demanda e respeito às restrições operativas do sistema.

O Planejamento da Expansão não faz parte do escopo do trabalho. Mais informações acerca desse tema podem ser encontradas em [5-6].

2.5 O Planejamento da Operação

O principal objetivo do Planejamento da Operação é a definição de quais unidades geradoras e que montantes de energia cada uma dessas unidades geradoras deve produzir, de forma a atender a demanda com o menor custo possível.

A coordenação da operação de sistemas que possuem usinas hidrelétricas para geração de energia geralmente é muito mais complexa do que o despacho de sistemas puramente termelétricos. A razão dessa maior complexidade está no acoplamento entre as usinas hidrelétricas, tanto eletricamente (alimentando as mesmas cargas), como hidráulicamente (podem estar na mesma cascata de um rio), isto é, a mesma porção de água que gera energia em uma usina será fonte de energia para outra usina à jusante. Há também restrições dos reservatórios quanto à navegação, irrigação, centros recreativos e à pesca. Descargas de grande volume de água também não devem ocorrer, pois podem causar efeitos danosos a jusante [2].

O custo da operação de cada unidade geradora é uma função do combustível por ela utilizada para a produção de energia. Como o combustível utilizado para a produção de energia elétrica em uma usina hidrelétrica é a água, poderíamos pensar que o custo de operação de uma usina hidrelétrica é nulo. Porém, na operação energética de um

sistema hidrotérmico existe uma relação entre a decisão tomada no presente e a sua consequência futura. Se no presente for gasto água em excesso e não chover para que essa água seja reposta, no futuro o custo de operação poderá vir a ser altíssimo (devido à geração térmica cara) ou poderá ocorrer déficit de energia. Por outro lado, se for usada geração térmica de modo a economizar a água dos reservatórios e muita chuva ocorrer, no futuro pode ser necessário verter água, resultando em um desperdício de energia. A Figura 2.5 apresenta um diagrama esquemático com as consequências da tomada de decisão na operação de um sistema hidrotérmico, que ilustra o acoplamento temporal do problema, que é dependente das afluências que virão a ocorrer.

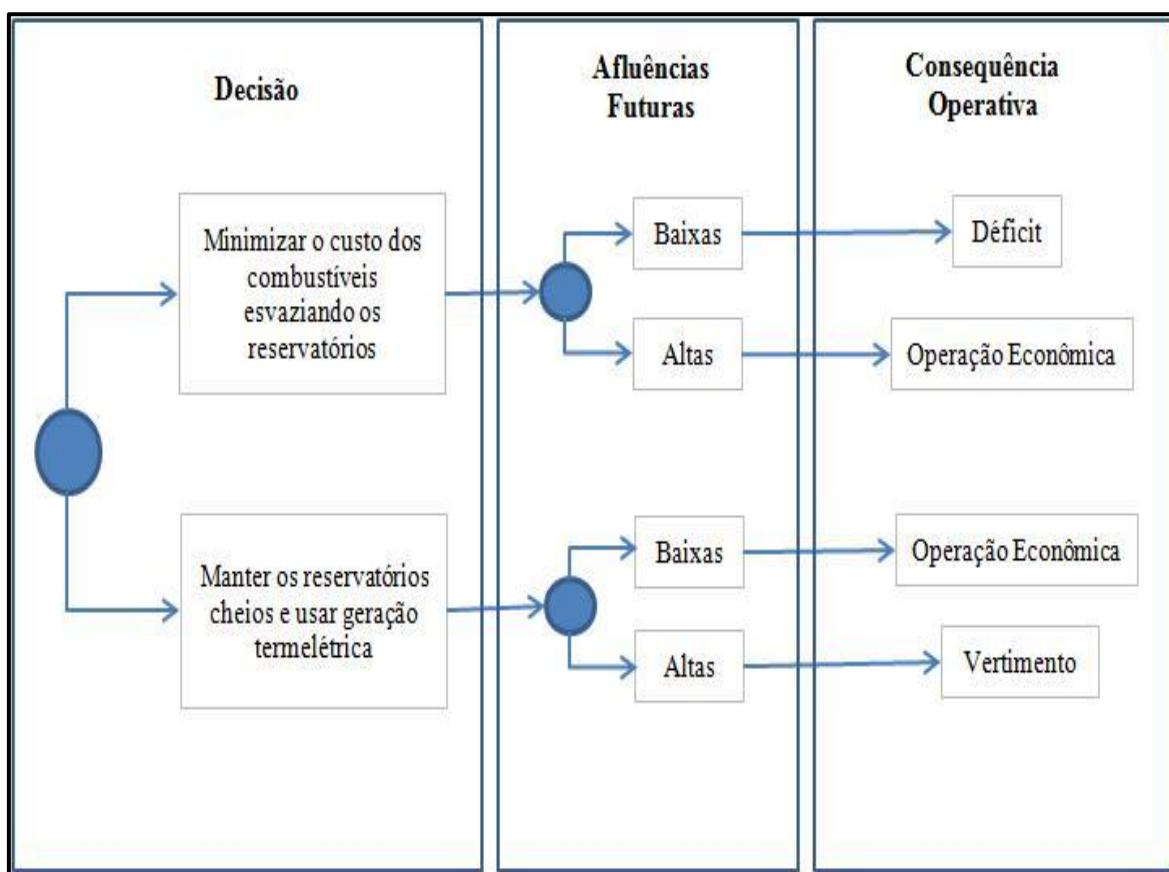


Figura 2.5: Diagrama esquemático com as consequências operativas na operação de um sistema hidrotérmico [2].

Além de acoplado no tempo, o problema da operação energética de um sistema hidrotérmico é também estocástico, já que não existe certeza quanto às afluências futuras no momento do planejamento.

Outro ponto importante na operação do sistema é o acoplamento espacial hidráulico entre as usinas situadas em um mesmo rio. A interdependência operativa é causada pelo aproveitamento conjunto dos recursos hidrelétricos, através da construção e da operação de usinas e reservatórios localizados em sequência nas bacias hidrográficas. Dessa forma, a operação de uma determinada usina depende das vazões liberadas a montante por outras usinas e/ou empresas, ao mesmo tempo em que sua operação afeta as usinas a jusante, de forma análoga [3,7].

A existência de várias bacias hidrográficas interligadas e a necessidade de avaliação das consequências do uso das reservas nos anos futuros leva ao emprego de um período longo de estudo, caracterizando o planejamento da operação como um problema de grande porte. Além disso, há não linearidades devido às funções de custos térmicos e de produção das usinas hidrelétricas. Como os benefícios da geração de uma usina hidrelétrica não podem ser medidos diretamente como função da usina somente, mas sim em termos da economia de combustíveis do sistema, tem-se que as variáveis envolvidas são não-separáveis [6].

Finalmente, o planejamento da operação de um sistema hidrotérmico deve levar em conta um amplo espectro de atividades, abrangendo desde a otimização plurianual dos reservatórios até o despacho das usinas, levando em conta as restrições operativas do sistema.

Devido às complexidades apresentadas, o problema do planejamento da operação de sistemas hidrotérmico é simplificado através da divisão do problema em subproblemas com estudos de longo, médio e curto prazo.

O planejamento da operação energética a médio e longo prazo possui uma natureza essencialmente estocástica, uma vez que não se conhece precisamente as afluências que irão ocorrer a cada estágio.

O objetivo principal do planejamento da operação energética a curto prazo é a desagregação das metas calculadas pelo planejamento de longo e médio prazo. Em contraste com as etapas de longo e médio prazo, quando as incertezas dos parâmetros são elevadas, o planejamento a curto prazo pode ser considerado como de natureza determinística, sendo razoável aceitar como conhecidas as previsões das afluências e demanda ao longo do horizonte de estudo. Os objetivos de cada estudo (longo, médio e curto prazo), conhecidos como cadeia de planejamento, serão detalhados mais a frente.

Em sistemas puramente hidrelétricos os custos de operação envolvidos podem estar associados a custos de penalização que refletem ao não atendimento ao mercado de energia. Em geral, a operação de sistemas hidrelétricos leva em conta funções composta de múltiplos objetivos como minimização de vertimentos, maximização do armazenamento no final do horizonte ou a distribuição equitativa de folgas de geração ao longo do horizonte de estudo [6].

A determinação do despacho de geração de cada usina é o objetivo básico do planejamento da operação a curto prazo de um sistema elétrico de potência. A operação hidrelétrica de um aproveitamento obedece ao princípio de conservação da água. Assim, o volume de água que entra no aproveitamento no período é igual à soma do volume perdido, da variação do nível do reservatório mais o volume liberado pelas turbinas e/ou vertedouros. O esquema simplificado de uma usina hidrelétrica está mostrado na Figura 2.6.

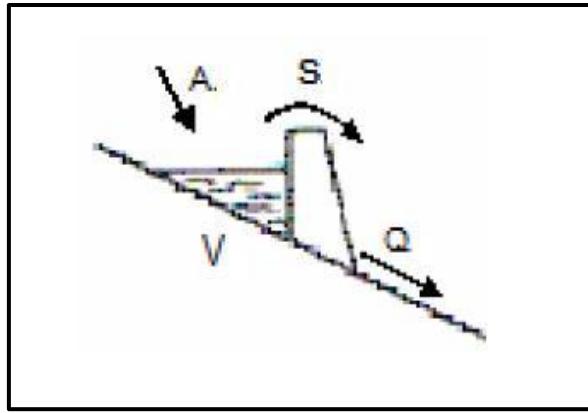


Figura 2.6: Esquema simplificado de uma usina hidrelétrica [2].

Aumentando o sistema hidrelétrico para mais duas usinas hidrelétricas no mesmo rio, o esquema simplificado fica conforme mostrado na Figura 2.7.

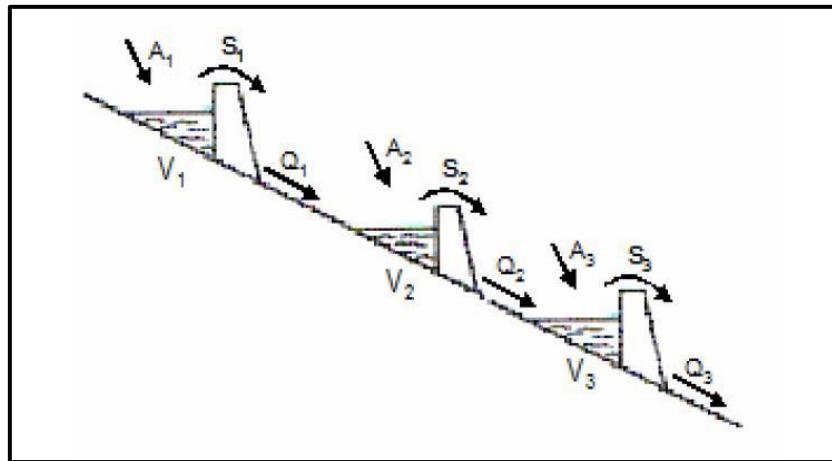


Figura 2.7: Esquema simplificado de três usinas hidrelétricas em cascata [2].

Sendo assim, a equação de balanço hídrico pode ser escrita da seguinte forma:

$$A_{i,t} + V_{i,t} + \left(\sum_{c \in \Omega} Q_{c,t-t_c} + S_{c,t-t_c} \right) - Q_{i,t} - S_{i,t} = V_{i,t+1} \quad (2.1)$$

onde:

- ✓ $A_{i,t}$ é o volume afluente que chega na usina i no instante de tempo t ;

- ✓ $V_{i,t}$ é o volume armazenado no reservatório da usina i no início do instante de tempo $t;c$
- ✓ $Q_{i,t}$ é o volume turbinado na usina i no instante de tempo t ;
- ✓ $S_{i,t}$ é o volume vertido na usina i no instante de tempo t ;
- ✓ $V_{i,t+1}$ é o volume armazenado no reservatório da usina i no início do instante de tempo $t+1$;
- ✓ Ω é o conjunto de usinas imediatamente a montante da usina i ;
- ✓ t_c é o tempo de viagem entre os reservatórios das usinas c e i ;

Os limites mínimos e máximos dos reservatórios, vazão turbinada e vazão vertida podem ser escritos como:

$$\underline{V}_{i,t} \leq V_{i,t} \leq \overline{V}_{i,t} \quad (2.2)$$

$$\underline{Q}_{i,t} \leq Q_{i,t} \leq \overline{Q}_{i,t} \quad (2.3)$$

$$\underline{S}_{i,t} \leq S_{i,t} \leq \overline{S}_{i,t} \quad (2.4)$$

onde

- ✓ $\underline{V}_{i,t}$ é o volume armazenado mínimo da usina i no instante de tempo t ;
- ✓ $\underline{Q}_{i,t}$ é o volume turbinado mínimo da usina i no instante de tempo t ;
- ✓ $\underline{S}_{i,t}$ é o volume vertido mínimo da usina i no instante de tempo t ;
- ✓ $\overline{V}_{i,t}$ é o volume armazenado máximo da usina i no instante de tempo t ;
- ✓ $\overline{Q}_{i,t}$ é o volume turbinado máximo da usina i no instante de tempo t ;
- ✓ $\overline{S}_{i,t}$ é o volume vertido máximo da usina i no instante de tempo t .

Outra restrição importante é a defluência das usinas, que pode ser escrita como:

$$\underline{u}_{i,t} < Q_{i,t} + S_{i,t} < \overline{u}_{i,t} \quad (2.5)$$

onde

- ✓ $\underline{u}_{i,t}$ é o volume defluente mínimo da usina i no instante de tempo t ;
- ✓ $\overline{u}_{i,t}$ é o volume defluente máximo da usina i no instante de tempo t .

A Figura 2.8 mostra uma representação esquemática de um aproveitamento situado em uma bacia hidrográfica para estudos energéticos. Na Figura são apresentadas as principais variáveis envolvidas na representação das usinas hidrelétricas em estudos energéticos. Deve ser ressaltado que $C_{i,t}$ está se referindo a cascata, representada na Equação (2.1) pelo somatório.

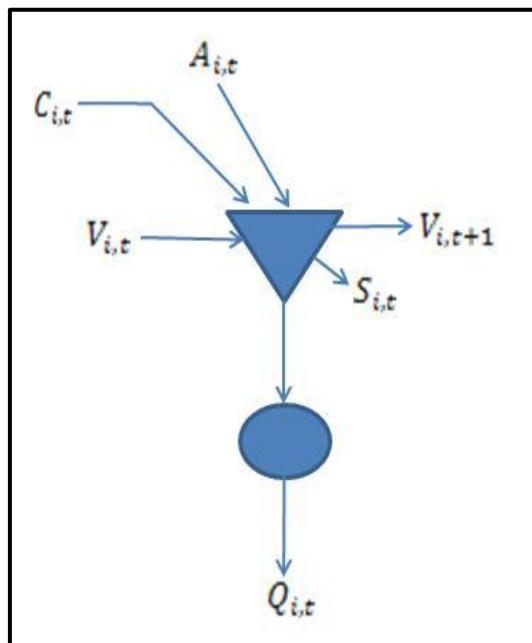


Figura 2.8: Representação esquemática de uma usina hidrelétrica para estudos energéticos.

Uma característica importante do planejamento da operação é que os intervalos de tempo são determinados previamente e discretizados para todo o período estudado. As perdas foram desconsideradas e todas as unidades das variáveis envolvidas no

problema são compatíveis, ou seja, as variáveis apresentam a mesma unidade de medida.

O planejamento da operação nos seus mais diferentes horizontes de estudo (longo, médio e curto prazo) possui nas usinas hidrelétricas uma importância que não se encontra em outros tipos de usina: a variação do volume ao longo do horizonte de planejamento e a capacidade do reservatório em análise. Maiores informações sobre isso podem ser encontradas em [7].

2.6 Cadeia para o Planejamento da Operação

O planejamento da operação de um sistema hidrotérmico é um problema de dimensão e de complexidade elevada, sendo portanto dividido em etapas de acordo com as decisões ao longo do tempo. Essas etapas formam a Cadeia de Planejamento [8-9].

Em sistemas com forte predominância hidráulica, faz-se necessário um planejamento considerando um horizonte de vários anos a frente, de modo a levar em conta a variação das afluências ao longo do tempo. Sendo assim, a Cadeia de Planejamento divide o problema do planejamento da operação em função do alcance das decisões no tempo, ou seja, em decisões para o longo, médio e curto prazo.

2.6.1 Planejamento a Longo Prazo

No planejamento a longo prazo considera-se a operação com um horizonte de vários anos a frente, onde os sistemas hidrelétricos e termelétricos são representados

agregadamente, modelados por um único reservatório e uma única térmica equivalentes, respectivamente.

O objetivo desta etapa é avaliar as condições de atendimento ao mercado, em termos de economia e confiabilidade energética, determinando a proporção entre a geração hidráulica total e a geração térmica total, ao longo do horizonte de planejamento, e o correspondente custo marginal.

Esta etapa da cadeia passará ao planejamento a médio prazo os custos marginais para a utilização dos recursos.

2.6.2 Planejamento a Médio Prazo

Nesta etapa, os sistemas hidrelétrico e termelétrico tem sua representação individualizada, relativo ao primeiro ano do horizonte de longo prazo. Neste caso geralmente não é representada a rede de transmissão.

Como resultado, o planejamento a médio prazo determina a geração média para todas as unidades geradoras, em todos os intervalos do horizonte de médio prazo. Um outro resultado importante é a obtenção de uma política de armazenamento para cada reservatório do sistema hidrelétrico, definindo o nível de armazenamento ao final de cada intervalo de tempo, ou seja, o planejamento a médio prazo delimita o estado inicial e o estado final do armazenamento a cada intervalo do horizonte de médio prazo, delimitando assim o volume total de água a ser utilizado durante cada intervalo de tempo, denominados de metas energéticas.

O valor da meta energética será passado para a etapa seguinte da cadeia, o planejamento de curto prazo.

2.6.3 Planejamento a Curto Prazo

O valor da meta energética fornecido pelo planejamento a médio prazo deve ser obedecido pelo planejamento de curto prazo. O planejamento a médio prazo não descreve o caminho realizado para o cumprimento da meta ao final do período considerado; por outro lado, o planejamento a curto prazo deve cumprir a meta estabelecida, assegurando a operacionalidade da solução. Para tanto, faz-se necessário uma representação detalhada da operação do sistema.

A Figura 2.9 mostra uma representação esquemática da Cadeia de Planejamento.

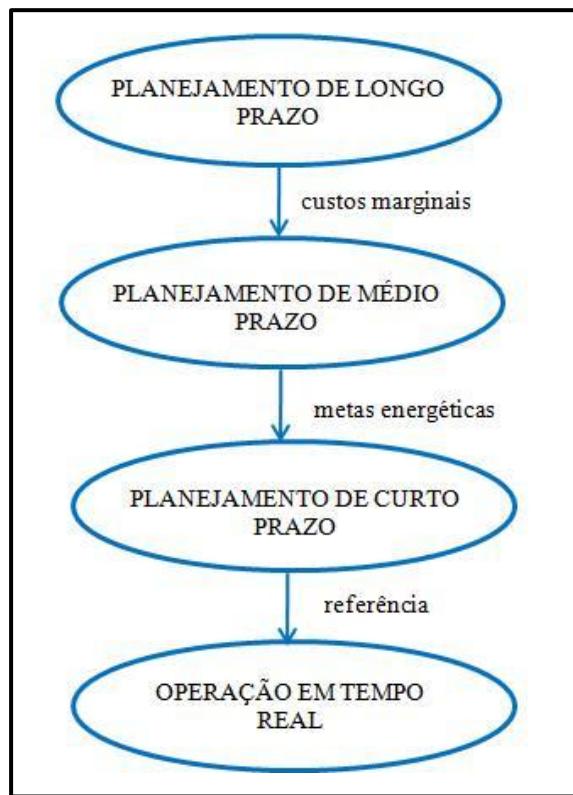


Figura 2.9: Representação esquemática da Cadeia de Planejamento.

CAPÍTULO 3

3 A CASCATA DO RIO PARDO: CARACTERÍSTICAS E MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1 Considerações iniciais

O objetivo de cada sistema de energia elétrica depende do gestor e das suas necessidades. No Brasil, busca-se normalmente a operação mais econômica.

Os métodos de otimização dos sistemas elétricos possuem procedimentos que determinam a tomada de decisão, seguindo critérios estabelecidos na montagem da função objetivo e que obedecem a um conjunto de restrições [10].

O modelo proposto no presente trabalho tem como objetivo principal formular o modelo otimizado para o planejamento energético da operação do sistema hidrelétrico da cascata do rio Pardo, constituído de usinas com características variadas destinadas à geração e ao armazenamento de energia. Este planejamento contempla os aspectos hidráulicos das usinas hidrelétricas para cada instante de tempo. Serão consideradas na modelagem matemática as restrições físicas da cascata e as paradas para manutenção preventiva das máquinas. Outras restrições, como a prevenção para cheias ou níveis mínimos de vazão (irrigação, meio ambiente) poderão ser implementadas, se consideradas relevantes. As restrições de transmissão entre áreas são desprezadas pois os estudos são de operação energética de usinas pertencentes a uma mesma cascata,

sendo as usinas consideradas como ligadas a um barramento único, que contém também toda a carga do sistema.

As usinas são modeladas de forma individual, mantendo, portanto, dados compatíveis com as características físicas e de localização da instalação das mesmas. Na modelagem não são levadas em conta a expansão da capacidade instalada ao longo do período de estudo, resultando assim em um modelo estático.

3.2 Descrição da cascata do rio Pardo

O sistema hidrelétrico estudado e modelado no presente trabalho é o sistema da cascata do rio Pardo pertencente à AES Tietê.

A AES Tietê possui um parque de usinas composto por 10 hidrelétricas, tem capacidade instalada de 2,65 mil megawatts e responde por cerca de 20% da energia gerada no Estado de São Paulo e de 2% da produção nacional de energia. Ao longo de 2009, as usinas produziram 14,5 mil GWh, ou seja, uma energia suficiente para abastecer 5 milhões de residências [11].

A cascata do rio Pardo é composta por 3 usinas hidrelétricas: Caconde, Euclides da Cunha e Limoeiro. Alguns dados importantes dessas usinas estão dados na Tabela 3.1. A Figura 3.1 mostra a usina hidrelétrica Caconde, a Figura 3.2 mostra a usina hidrelétrica Euclides da Cunha e a Figura 3.3 mostra a usina hidrelétrica Limoeiro [11].

Tabela 3.1: Dados importantes das usinas da cascata do rio Pardo.

Usina	Início da operação	Quantidade de turbinas	Quantidade de circuitos	Tensão nominal (kV)	Capacidade instalada (MW)c
Caconde	1966	2	2	138	80
Euclides da Cunha	1960	4	8	138	109
Limoeiro	1958	2	4	138	32



Figura 3.1: Usina hidrelétrica Caconde [11].



Figura 3.2: Usina hidrelétrica Euclides da Cunha [11].



Figura 3.3: Usina hidrelétrica Limoeiro [11].

A disposição das usinas pertencentes a cascata do rio Pardo está mostrada na Figura 3.4 [12]. Essa disposição das usinas indica o sentido da afluência do rio. A cascata do rio Pardo faz parte do conjunto das usinas hidrelétricas pertencentes ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

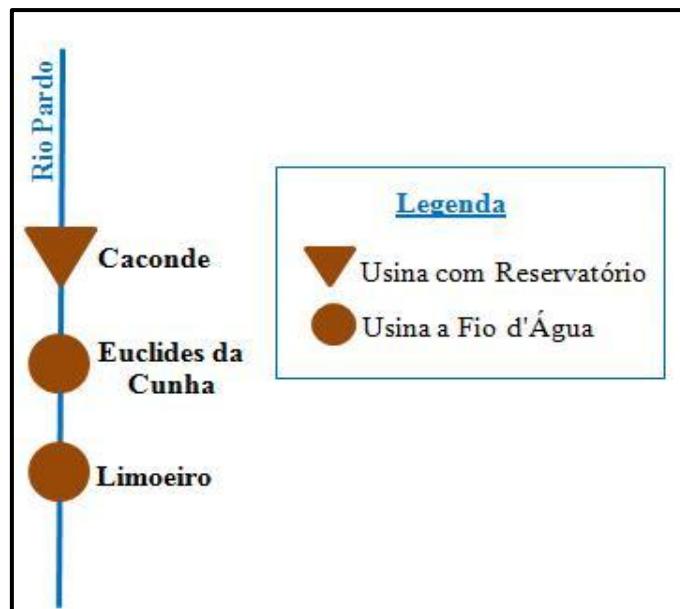


Figura 3.4: Disposição das usinas hidrelétricas existentes na cascata do rio Pardo.

3.3 Variáveis envolvidas na descrição do problema

A finalidade de uma usina hidrelétrica é a geração de energia elétrica pelo aproveitamento das quedas d'água existentes em um rio, transformando a energia potencial da água em energia elétrica, conforme foi explicado no Capítulo 2.

O presente trabalho tem como objetivo o planejamento energético da operação a curto prazo de um sistema puramente hidrelétrico. A curto prazo é possível utilizar previsões, mesmo que rudimentares, das vazões afluentes aos reservatórios; o problema deixa de ser estocástico (sob incertezas), transformando-se em determinístico (informações conhecidas). A operação hidroelétrica entrega a energia em uma mesma barra, possibilitando a modelagem puramente energética, sem considerar a transmissão. Será construído, portanto, um modelo estático, barramento único e as usinas individualizadas, cujo horizonte de estudo é mensal com base diária. As principais variáveis envolvidas na descrição do modelo matemático são:

- A: energia afluente
- C: energia de cascata (proveniente de usinas imediatamente a montante)
- V: energia armazenada no reservatório
- Q: energia turbinada
- S: energia vertida
- E: energia desviada

A *energia afluente A* representa a energia que chega em uma usina em um determinado instante de tempo proveniente de fontes externas à cascata (chuva, outros rios, etc).

A *energia de cascata* C representa a energia defluente de usinas imediatamente a montante que chega em uma usina em um determinado instante de tempo. Esta energia passa a ser uma energia afluente para a usina em estudo. Esta variável mostra o acoplamento espacial de um sistema hidrelétrico em cascata.

A *energia* V representa a quantidade de energia armazenada no reservatório de uma usina em um determinando instante de tempo, sendo o valor desta variável limitado por um valor mínimo e um valor máximo que permita a operação normal da usina.

A *energia turbinada* Q representa a energia que foi efetivamente utilizada na transformação da energia hidráulica em energia elétrica em uma usina em um determinando instante de tempo, sendo o valor desta variável limitado por um valor mínimo e um valor máximo, que representam os limites da turbina.

A *energia vertida* S e a *energia desviada* E representam energias defluentes que não foram utilizadas na transformação da energia hidráulica em energia elétrica em uma usina em um determinando instante de tempo, sendo os valores destas variáveis limitados por valores mínimos e máximos.

3.4 A modelagem matemática da cascata do rio Pardo

A formulação matemática para esse problema pode ser derivada a partir de um subsistema genérico, que está mostrado na Figura 3.5. Para maior simplicidade e clareza, mas sem perda de generalidade, a Figura 3.5 está mostrando apenas uma usina hidrelétrica em um determinado instante de tempo.

Formulações matemáticas para diferentes tipos de problema, ou seja, com variados objetivos, podem ser encontradas em [13-16].

Uma importante observação na formulação matemática é que todas as unidades são compatíveis, ou seja, afluências, armazenamentos, turbinamentos, vertimentos e desvios são expressos em megawatthora (MWh). Os intervalos de tempo foram discretizados igualmente para todo o período estudado e **todas as perdas** foram desconsideradas na formulação.

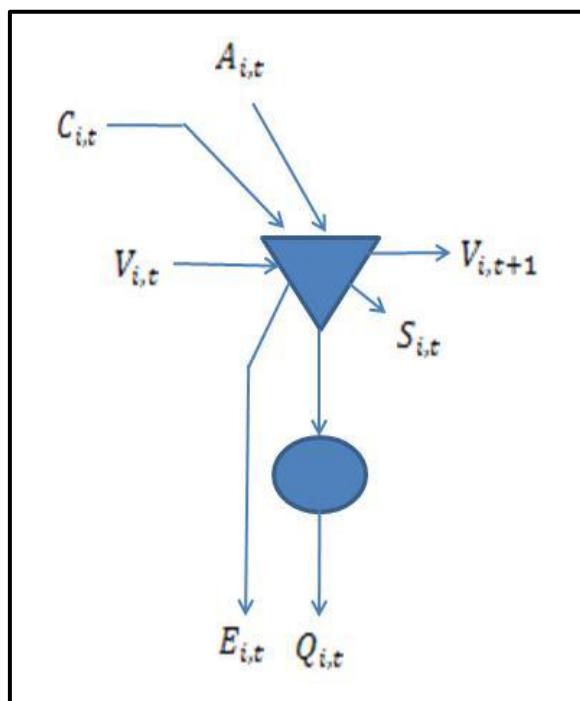


Figura 3.5: Subsistema hidrelétrico genérico.

3.4.1 A função objetivo

Não é possível, neste trabalho, modelar a real função objetivo da AES Tietê sem divulgar informações confidenciais da empresa. Considerando que a real função objetivo representa uma simples restrição para o problema, utilizaremos então uma função objetivo padrão: a maximização das reservas de energia em um determinado

intervalo de tempo para o conjunto de usinas desta cascata. Levanto em conta que a maximização dos estoques nos reservatórios minimiza a água utilizada para o atendimento à demanda, essa função caracteriza o melhor uso da água disponível. A função objetivo pode ser formulada como

$$\text{Max } Y \quad (3.1)$$

onde

- ✓ Y é a energia armazenada no sistema ao longo de um determinado intervalo de tempo.

A energia armazenada é dada pelo somatório das energias armazenadas nas usinas da cascata no intervalo de tempo sob estudo. A função objetivo da operação pode, portanto, ser escrita como

$$\text{Max } Y = V_{I,T} \quad (3.2)$$

onde

- ✓ I é o conjunto total de usinas, ou seja, é o número de usinas existentes na cascata;
- ✓ T é o conjunto total de instantes de tempo do horizonte em estudo;
- ✓ $V_{I,T}$ é a energia armazenada no reservatório das N usinas pertencentes a cascata durante o intervalo de tempo T .

A Equação (3.2), para maior facilidade de visualização, também pode ser escrita como

$$\text{Max } Y = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T V_{i,t+1} \quad (3.3)$$

onde

- ✓ $V_{i,t+1}$ é a energia armazenada no reservatório da usina i no início do instante de tempo $t+1$, ou, equivalentemente, é a energia armazenada no reservatório da usina i no final do instante de tempo t .

3.4.2 As restrições operativas

Aqui serão apresentadas as principais restrições operativas. A formulação matemática das restrições operativas será descrita pelos conjuntos de equações e inequações mostradas a seguir. É importante ressaltar novamente que os intervalos de tempo são discretizados igualmente para todo o período estudado e que as todas as perdas são desprezadas.

3.4.2.1 Balanço hídrico

A variação da energia armazenada em um reservatório de um instante de tempo até o instante de tempo seguinte é dada por

$$A_{i,t} + V_{i,t} + C_{i,t} - Q_{i,t} - S_{i,t} - E_{i,t} = V_{i,t+1} \quad (3.4)$$

onde

- ✓ $A_{i,t}$ é a energia afluente que chega na usina i no instante de tempo t ;
- ✓ $V_{i,t}$ é a energia armazenada no reservatório da usina i no início do instante de tempo t ;
- ✓ $C_{i,t}$ é a energia de cascata que chega na usina i no instante de tempo t ;
- ✓ $Q_{i,t}$ é a energia turbinada na usina i no instante de tempo t ;
- ✓ $S_{i,t}$ é a energia vertida na usina i no instante de tempo t ;

- ✓ $E_{i,t}$ é a energia desviada na usina i no instante de tempo t;

A Equação (3.4) leva em conta todas as variáveis que podem interferir na variação da energia armazenada. A energia de cascata, $C_{i,t}$, presente na Equação (3.4), é dada por

$$C_{i,t} = \sum_{c \in \Omega} Q_{c,t-t_c} + S_{c,t-t_c} + E_{c,t-t_c} \quad (3.5)$$

onde

- ✓ Ω é o conjunto de usinas imediatamente a montante da usina i;
- ✓ t_c é o tempo de viagem entre os reservatórios das usinas c e i.

Pode-se observar que a Equação (3.5) leva em conta o acoplamento operativo (espacial) entre as usinas pertencentes a uma mesma bacia hidrográfica.

Na verdade, a cascata do rio Pardo não apresenta, ainda, desvios importantes de energia. Esta variável foi modelada visando uma necessidade futura.

3.4.2.2 Defluência

A defluência de uma usina em um determinado instante de tempo corresponde a soma da energia turbinada, energia vertida e energia desviada, caso esta volte para o rio. Se a energia desviada for utilizada para a irrigação ela não representará a defluência de uma usina. Essa defluência deve ser maior que um valor mínimo, que é um valor dependente da usina. Essa restrição pode ser escrita como

$$Q_{i,t} + S_{i,t} + E_{i,t} \geq \underline{u}_{i,t} \quad (3.6)$$

onde

- ✓ $\underline{u}_{i,t}$ é a energia defluente mínima da usina i no instante de tempo t.

O limite mínimo de defluência depende da capacidade de turbinamento mínimo e restrições de uso da água a jusante. O limite máximo de defluência depende da capacidade de turbinamento, vertimento e desvio máximo e também de restrições de uso da água a jusante [16]. Entretanto, o limite máximo de defluência não será utilizado neste trabalho.

3.4.2.3 Demanda

Na verdade, a operação brasileira é conjunta, e não existe a obrigação individualizada de atendimento à demanda por parte de cada empresa. Consideraremos aqui o atendimento para generalizar o problema e respeitar a confidencialidade dos objetivos da AES Tietê.

A energia turbinada representa a energia efetivamente transformada em energia elétrica, ou seja, a energia utilizada para atender a demanda. Sendo assim, pode-se escrever a seguinte equação

$$\sum_{i=1}^I Q_{i,t} = D_t \quad (3.7)$$

onde

- ✓ D_t é a demanda de energia no instante de tempo t.

A Equação (3.7) representa o despacho das unidades hidrelétricas existentes, de forma a atender a demanda da melhor forma possível.

3.4.2.4 Limitações físicas dos equipamentos disponíveis

Os equipamentos considerados serão as turbinas instaladas, os reservatórios para armazenamento e as unidades geradoras disponíveis.

➤ Energia Turbinada

Uma usina é composta por um ou mais geradores, sendo os valores mínimos e máximos de energia turbinada valores para o conjunto de geradores totais pertencentes a usina. No entanto, pode ser que existam geradores que estejam em manutenção em um determinado instante de tempo, ocasionando uma redução dos valores de energia turbinada mínima e máxima.

Sendo assim, fração da disponibilidade da potência máxima é dada por

$$\alpha_{i,t} = \frac{N_{i,t}}{N_{i,total}} \quad (3.8)$$

onde

- ✓ $\alpha_{i,t}$ é o fator que indica a fração da disponibilidade da potência máxima da usina i em funcionamento no instante de tempo t (para representar as saídas forçadas ou não de unidades da usina);
- ✓ $N_{i,t}$ é o número de geradores da usina i no instante de tempo t que estão em funcionamento;
- ✓ $N_{i,total}$ é o número total de geradores da usina i .

Uma observação importante é que o $\alpha_{i,t}$ está entre zero e um.

A faixa de valores de energia turbinada depende principalmente das características das turbinas, sendo que estas variam de um valor mínimo, correspondente à abertura mínima das turbinas, até um valor máximo, correspondente à

abertura máxima das turbinas. Esses valores dependem da disponibilidade das máquinas. Essa restrição pode ser escrita como

$$\alpha_{i,t} \underline{Q}_{i,t} \leq Q_{i,t} \leq \alpha_{i,t} \overline{Q}_{i,t} \quad (3.9)$$

onde

- ✓ $\underline{Q}_{i,t}$ é a energia turbinada mínima da usina i no instante de tempo t;
- ✓ $\overline{Q}_{i,t}$ é a energia turbinada máxima da usina i no instante de tempo t.

➤ Energia Armazenada nos Reservatórios

A faixa de valores de energia armazenada depende principalmente da característica do reservatório, sendo que estes variam de um valor mínimo, correspondente ao nível mínimo operativo, até um valor máximo, correspondente ao nível máximo operativo. Essa restrição pode ser escrita como

$$\underline{V}_{i,t} \leq V_{i,t} \leq \overline{V}_{i,t} \quad (3.10)$$

onde

- ✓ $\underline{V}_{i,t}$ é a energia armazenada mínima da usina i no instante de tempo t;
- ✓ $\overline{V}_{i,t}$ é a energia armazenada máxima da usina i no instante de tempo t.

Esses limites não são dados somente pelos limites físicos dos reservatórios. Outros aspectos também são levados em conta, como controle das cheias, irrigação e navegação [16].

É interessante notar que a capacidade de armazenamento pode variar ao longo do tempo para acomodar limites de defluências, controles de cheias, curvas de aversão, etc.

➤ Energia Vertida

A energia vertida representa uma energia que não passa pelas turbinas, deixando assim de produzir energia elétrica. A faixa de valores de energia vertida varia de um valor mínimo, até um valor máximo. Essa restrição pode ser escrita como

$$\underline{S}_{i,t} \leq S_{i,t} \leq \overline{S}_{i,t} \quad (3.11)$$

onde

- ✓ $\underline{S}_{i,t}$ é a energia vertida mínima da usina i no instante de tempo t;
- ✓ $\overline{S}_{i,t}$ é a energia vertida máxima da usina i no instante de tempo t.

➤ Energia Desviada

A energia desviada também representa uma energia que não passa pelas turbinas, deixando assim de produzir energia elétrica. A faixa de valores de energia desviada varia de um valor mínimo, até um valor máximo. Essa restrição pode ser escrita como

$$\underline{E}_{i,t} \leq E_{i,t} \leq \overline{E}_{i,t} \quad (3.12)$$

onde

- ✓ $\underline{E}_{i,t}$ é a energia desviada mínima da usina i no instante de tempo t;
- ✓ $\overline{E}_{i,t}$ é a energia desviada máxima da usina i no instante de tempo t.

3.4.3 A formulação matemática final para a cascata do rio Pardo

O problema do planejamento energético da operação da cascata do rio Pardo é formulado como um problema de otimização onde se quer maximizar as reservas de energia de um sistema hidrelétrico ao longo de todo o instante de tempo, sujeito a restrições de igualdade e desigualdade.

A formulação matemática completa para o problema de otimização do planejamento energético da operação da cascata do rio Pardo pode ser escrito então da seguinte forma

$$\text{Max } Y = V_{l,T} \quad (3.13)$$

sujeito a

$$A_{i,t} + V_{i,t} + C_{i,t} - Q_{i,t} - S_{i,t} - E_{i,t} = V_{i,t+1}$$

$$C_{i,t} = \sum_{c \in \Omega} Q_{c,t-t_c} + S_{c,t-t_c} + E_{c,t-t_c}$$

$$Q_{i,t} + S_{i,t} + E_{i,t} \geq \underline{u}_{i,t}$$

$$\sum_{i=1}^I Q_{i,t} = D_t$$

$$\alpha_{i,t} = \frac{N_{i,t}}{N_{i,total}} \quad (3.14)$$

$$\underline{\alpha}_{i,t} \underline{Q}_{i,t} \leq Q_{i,t} \leq \overline{\alpha}_{i,t} \overline{Q}_{i,t}$$

$$\underline{V}_{i,t} \leq V_{i,t} \leq \overline{V}_{i,t}$$

$$\underline{S}_{i,t} \leq S_{i,t} \leq \overline{S}_{i,t}$$

$$\underline{E}_{i,t} \leq E_{i,t} \leq \overline{E}_{i,t}$$

$$0 \leq \alpha_{i,t} \leq 1$$

$$i = 1, 2, \dots, I$$

$$t = 1, 2, \dots, T$$

Os dados de entrada correspondem a:

- Energia afluente $A_{i,t}$
- Energia armazenada inicial $V_{i,1}$
- Defluência mínima $\underline{u}_{i,t}$
- Demanda D_t
- Número total de geradores $N_{i,total}$
- Tubinamento mínimo $\underline{Q}_{i,t}$ e turbinamento máximo $\overline{Q}_{i,t}$
- Vertimento mínimo $\underline{S}_{i,t}$ e vertimento máximo $\overline{S}_{i,t}$
- Desvio mínimo $\underline{E}_{i,t}$ e desvio máximo $\overline{E}_{i,t}$
- Armazenamento mínimo $\underline{V}_{i,t}$ e armazenamento máximo $\overline{V}_{i,t}$

As variáveis de controle correspondem a:

- Energia turbinada $Q_{i,t}$
- Energia vertida $S_{i,t}$
- Energia desviada $E_{i,t}$
- Energia armazenada $V_{i,t+1}$
- Número de geradores em funcionamento $N_{i,t}$

As equações que formam o problema são simplesmente balanços e limites.

Todas as equações que formam o problema são lineares. A maior dificuldade na solução

do problema consiste no número de instantes de tempo desejados: quanto maior a discretização, maior será o número de equações a serem consideradas e maior será o porte do problema.

Felizmente, as dificuldades ficaram para trás, pois os otimizadores modernos, aliados a computadores cada vez mais velozes, permitem a solução rápida e eficiente do problema de operação ótima, em poucos minutos, utilizando um simples notebook ou um simples computador comum.

CAPÍTULO 4

4 A IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DA CASCATA DO RIO PARDO

4.1 Considerações iniciais

O Capítulo 3 apresentou a modelagem matemática para o planejamento energético da operação da cascata do rio Pardo. Foram levados em conta todos os aspectos hidráulicos do problema, no qual se busca a solução que satisfaça a condição ótima para a operação do sistema hidrelétrico, não sendo levados em conta os aspectos elétricos do sistema.

No presente capítulo será apresentada a técnica adotada para resolver o problema da operação otimizada da cascata do rio Pardo. O presente trabalho é de natureza computacional, onde os principais recursos utilizados foram um microcomputador e um software, que consiste basicamente na aplicação do modelo linear do otimizador *What'sBest!*, integrado a uma planilha Excel.

4.2 Descrição do problema

O modelo descrito no Capítulo 3 foi implementado para obter a solução ótima para o planejamento energético da operação da cascata do rio Pardo. Como ferramenta para a otimização foi utilizado o otimizador *What'sBest!*, que é um otimizador integrado a planilhas Excel. Informações adicionais sobre a utilização do otimizador *What'sBest!* podem ser encontradas no Apêndice C.

As principais características do problema do planejamento energético da operação da cascata do rio Pardo são:

- **Inteiro Misto:** O problema possui variáveis inteiras, para a determinação de quantos geradores da usina devem estar em funcionamento; e variáveis contínuas, para a determinação das energias armazenada, turbinada, vertida e desviada;
- **Linear:** Todas as variáveis que guiam a resolução deste problema possuem natureza linear. Sendo assim, o problema pode ser resolvido por Programação Linear;
- **Grande porte:** O problema possui muitas equações a serem consideradas devido a discretização do tempo.

4.3 Implementação do problema de otimização

A planilha que soluciona o problema de otimização é formada por seis guias fixas e uma guia que é criada quando o problema é resolvido. As guias fixas tem os seguintes nomes: "Visualização de Resultados", "Resultados", "Caconde", "Euclides da

Cunha", "Limoeiro" e "Demanda e Função Objetivo". Já a guia criada quando o problema é resolvido tem o nome de "WB! Status".

Abaixo segue uma descrição do que está em cada guia da planilha que soluciona o problema de otimização da cascata do rio Pardo. Como já comentado, as restrições da AES Tietê impedem a apresentação de informações confidenciais da empresa. Por este motivo, os dados reais serão substituídos por dados fictícios. O estudo, entretanto, é realista na medida em que todas as restrições e toda a complexidade do problema foram preservadas.

O estudo corresponde ao planejamento da operação a curto prazo e abrange um horizonte mensal com 30 instantes de tempo, ou seja, discretização diária. A Tabela 4.1 apresenta os dados de entrada fictícios usados para solucionar o problema de otimização. Esses dados foram utilizados em todos os instantes de tempo.

Tabela 4.1: Dados de entrada para o problema de otimização.

	Caconde	Euclides da Cunha	Limoeiro
Energia afluente (MWh)	100	30	10
Energia inicial (MWh)	100	10	5
Energia armazenada mínima (MWh)	60	2	0
Energia armazenada máxima (MWh)	20000	120	40
Energia turbinada mínima (MWh)	10	10	10
Energia turbinada máxima (MWh)	80	109	32
Energia vertida mínima (MWh)	0	0	0
Energia vertida máxima (MWh)	100	100	100
Energia desviada mínima (MWh)	0	0	0
Energia desviada máxima (MWh)	30	30	30
Energia defluente mínima (MWh)	10	10	10
Demandas (MWh)		150	

As guias referentes às usinas da cascata do rio Pardo - "*Caconde*", "*Euclides da Cunha*" e "*Limoeiro*" - são guias que possuem as equações da modelagem matemática, propostas no Capítulo 3. Essas equações valem para cada instante de tempo e para cada usina pois o número de equações a ser considerado é dependente da discretização do tempo. Nestas três guias da planilha são colocadas:

➤ As variáveis e dados de entrada do problema:

- ✓ Número total de geradores ($N_{i,\text{total}}$);
- ✓ Número de geradores em funcionamento ($N_{i,t}$);
- ✓ Energia afluente ($A_{i,t}$);
- ✓ Energia proveniente da cascata ($C_{i,t}$);
- ✓ Energia armazenada no início do instante ($V_{i,t}$);
- ✓ Energia armazenada ao final do instante ($V_{i,t+1}$);
- ✓ Energia turbinada ($Q_{i,t}$);
- ✓ Energia vertida ($S_{i,t}$);
- ✓ Energia desviada ($E_{i,t}$).

➤ As restrições do problema:

- ✓ Balanço (Equação (3.4));
- ✓ Defluência (Equação (3.6));
- ✓ Turbinamento (Equação (3.9));
- ✓ Manutenção (Equação (3.8));
- ✓ Volume (Equação (3.10));
- ✓ Vertimento (Equação (3.11));
- ✓ Desvio (Equação (3.12)).

Todas as variáveis e restrições citadas são colocadas para cada instante de tempo. A Figura 4.1 apresenta esquematicamente como foram colocadas as variáveis e restrições na guia referente à usina Caconde. A disposição das variáveis e das restrições do problema, conforme mostrado na Figura 4.1, é semelhante para as três guias das usinas ("Caconde", "Euclides da Cunha" e "Limoeiro").

Com relação as variáveis de controle $V_{i,t+1}$, $Q_{i,t}$, $S_{i,t}$ e $E_{i,t}$, seus valores são reais contínuos, pois estes podem assumir quaisquer valor. Já a variável de controle $N_{i,t}$ é inteira, pois não é possível o funcionamento de uma fração da máquina; o gerador está em funcionamento ou não.

Caconde											
	t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Variáveis	$N_{i,t}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	$N_{i,t}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	$\alpha_{i,t}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	$A_{i,t}$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	$C_{i,t}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$V_{i,t}$	100	120,5	157	213	269	325	381	437	493	549
	$Q_{i,t}$	79,5	63,5	44	44	44	44	44	44	44	44
	$S_{i,t}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$E_{i,t}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$V_{i,t+1}$	120,5	157	213	269	325	381	437	493	549	605
Manutenção	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq
	$\alpha_{i,t}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	\leq	$=\leq$									
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Volume	$V_{i,t}$ (min)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq
	$V_{i,t}$	100	120,5	157	213	269	325	381	437	493	549
	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq
	$V_{i,t}$ (max)	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
Turbinamento	$Q_{i,t}$ (min)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	$\alpha_{i,t} \times Q_{i,t}$ (min)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq
	$Q_{i,t}$	79,5	63,5	44	44	44	44	44	44	44	44
	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq
	$\alpha_{i,t} \times Q_{i,t}$ (max)	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	$Q_{i,t}$ (max)	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Vertimento	$S_{i,t}$ (min)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	\leq	$=\leq$									
	$S_{i,t}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq
	$S_{i,t}$ (max)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Desvio	$E_{i,t}$ (min)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	\leq	$=\leq$									
	$E_{i,t}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq	\leq
	$E_{i,t}$ (max)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Balanço	$C_{i,t} + A_{i,t} + V_{i,t} - S_{i,t} - Q_{i,t} - E_{i,t}$	120,5	157	213	269	325	381	437	493	549	605
	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	$V_{i,t+1}$	120,5	157	213	269	325	381	437	493	549	605
Defluência	$S_{i,t} + Q_{i,t} + E_{i,t}$	79,5	63,5	44	44	44	44	44	44	44	44
	\geq	\geq	\geq	\geq	\geq	\geq	\geq	\geq	\geq	\geq	\geq
	$u_{i,t}$ (min)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Figura 4.1: Guia da usina Caconde com visualização para apenas 10 instantes de tempo.

A Figura 4.2 mostra como foi colocada a restrição de demanda do problema (Equação (3.7)) e a função objetivo (Equação (3.3)), na guia "*Demand e Função Objetivo*" da planilha.

	t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Demanda	sum(Q _{i,t})	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	
	D _t	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Função Objetivo											
Max V _{I,T}		32226									

Figura 4.2: Guia com a restrição de demanda com visualização para apenas 10 instantes de tempo e a função objetivo do problema.

A solução do problema é obtida pelo otimizador, executado ao comando do usuário. É interessante notar que, apesar do porte do problema, a solução é obtida rapidamente, em frações de segundos. A Figura 4.3 mostra o status da solução do problema de otimização, após a sua solução. Para a exibição desse status é criado automaticamente na planilha uma guia chamada "WB! Status" assim que o problema é solucionado.

What'sBest!® 9.0.3.3 (Sep 08, 2008) - Library 5.0.1.307 - Status Report -

DATE GENERATED: nov 28, 2010 07:25 PM

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA	Current	Capacity Limits
Numerics	2382	
Variables	2725	
Adjustables	450	Unlimited
Constraints	1110	Unlimited
Integers/Binaries	90/0	Unlimited
Nonlinears	0	Unlimited
Coefficients	5590	

Minimum coefficient value: 0.25 on Euclides da Cunha!C6
Minimum coefficient in formula: Euclides da Cunha!C7
Maximum coefficient value: 20000 on <RHS>
Maximum coefficient in formula: Caconde!D25

MODEL TYPE: Mixed Integer / Linear

SOLUTION STATUS: GLOBALLY OPTIMAL

OBJECTIVE VALUE: 32226

DIRECTION: Maximize

SOLVER TYPE: Branch-and-Bound

TRIES: 563

INFEASIBILITY: 7.105427357601e-015

BEST OBJECTIVE BOUND: 32226

STEPS: 0

ACTIVE: 0

SOLUTION TIME: 0 Hours 0 Minutes 1 Seconds

End of Report

Figura 4.3: Guia WB! Status que exibe todo o status da otimização.

Na guia "Resultados" da planilha estão presentes todas as variáveis energéticas que descrevem a cascata do rio Pardo, incluindo dados de entrada e variáveis de controle. A solução do problema é sintetizada nos dados da Figura 4.4 para a usina Caconde, da Figura 4.5 para a usina Euclides da Cunha e da Figura 4.6 para a usina Limoeiro.

Tempo	Caconde								
	Instante	N _{i,t}	A _{i,t}	C _{i,t}	V _{i,t}	Q _{i,t}	S _{i,t}	E _{i,t}	V _{i,t+1}
1		2	100	0	100	79,5	0	0	120,5
2		2	100	0	120,5	63,5	0	0	157
3		2	100	0	157	44	0	0	213
4		2	100	0	213	44	0	0	269
5		2	100	0	269	44	0	0	325
6		2	100	0	325	44	0	0	381
7		2	100	0	381	44	0	0	437
8		2	100	0	437	44	0	0	493
9		2	100	0	493	44	0	0	549
10		2	100	0	549	44	0	0	605
11		2	100	0	605	44	0	0	661
12		2	100	0	661	44	0	0	717
13		2	100	0	717	44	0	0	773
14		2	100	0	773	44	0	0	829
15		2	100	0	829	44	0	0	885
16		2	100	0	885	44	0	0	941
17		2	100	0	941	44	0	0	997
18		2	100	0	997	44	0	0	1053
19		2	100	0	1053	44	0	0	1109
20		2	100	0	1109	44	0	0	1165
21		2	100	0	1165	44	0	0	1221
22		2	100	0	1221	44	0	0	1277
23		2	100	0	1277	44	0	0	1333
24		2	100	0	1333	44	0	0	1389
25		2	100	0	1389	44	0	0	1445
26		2	100	0	1445	44	0	0	1501
27		2	100	0	1501	44	0	0	1557
28		2	100	0	1557	44	0	0	1613
29		2	100	0	1613	44	0	0	1669
30		1	100	0	1669	31	100	30	1608

Figura 4.4: Dados da solução otimizada para a usina Caconde.

Tempo		Euclides da Cunha							
		N _{j,t}	A _{j,t}	C _{j,t}	V _{j,t}	Q _{j,t}	S _{j,t}	E _{j,t}	V _{j,t+1}
1		4	30	79,5	10	38,5	0	0	81
2		2	30	63,5	81	54,5	0	0	120
3		3	30	44	120	74	0	0	120
4		3	30	44	120	74	0	0	120
5		3	30	44	120	74	0	0	120
6		3	30	44	120	74	0	0	120
7		3	30	44	120	74	0	0	120
8		3	30	44	120	74	0	0	120
9		3	30	44	120	74	0	0	120
10		3	30	44	120	74	0	0	120
11		3	30	44	120	74	0	0	120
12		3	30	44	120	74	0	0	120
13		3	30	44	120	74	0	0	120
14		3	30	44	120	74	0	0	120
15		3	30	44	120	74	0	0	120
16		3	30	44	120	74	0	0	120
17		3	30	44	120	74	0	0	120
18		3	30	44	120	74	0	0	120
19		3	30	44	120	74	0	0	120
20		3	30	44	120	74	0	0	120
21		3	30	44	120	74	0	0	120
22		3	30	44	120	74	0	0	120
23		3	30	44	120	74	0	0	120
24		3	30	44	120	74	0	0	120
25		3	30	44	120	74	0	0	120
26		3	30	44	120	74	0	0	120
27		3	30	44	120	74	0	0	120
28		3	30	44	120	74	0	0	120
29		3	30	44	120	74	0	0	120
30		4	30	161	120	109	100	30	72

Figura 4.5: Dados da solução otimizada para a usina Euclides da Cunha.

Tempo		Limoeiro							
		N _{i,t}	A _{i,t}	C _{i,t}	V _{i,t}	Q _{i,t}	S _{i,t}	E _{i,t}	V _{i,t+1}
Instante									
1		2	10	38,5	5	32	0	0	21,5
2		2	10	54,5	21,5	32	0	14	40
3		2	10	74	40	32	52	0	40
4		2	10	74	40	32	52	0	40
5		2	10	74	40	32	52	0	40
6		2	10	74	40	32	52	0	40
7		2	10	74	40	32	52	0	40
8		2	10	74	40	32	52	0	40
9		2	10	74	40	32	52	0	40
10		2	10	74	40	32	52	0	40
11		2	10	74	40	32	52	0	40
12		2	10	74	40	32	52	0	40
13		2	10	74	40	32	52	0	40
14		2	10	74	40	32	52	0	40
15		2	10	74	40	32	52	0	40
16		2	10	74	40	32	52	0	40
17		2	10	74	40	32	52	0	40
18		2	10	74	40	32	52	0	40
19		2	10	74	40	32	52	0	40
20		2	10	74	40	32	52	0	40
21		2	10	74	40	32	52	0	40
22		2	10	74	40	32	52	0	40
23		2	10	74	40	32	52	0	40
24		2	10	74	40	32	52	0	40
25		2	10	74	40	32	52	0	40
26		2	10	74	40	32	52	0	40
27		2	10	74	40	32	52	0	40
28		2	10	74	40	32	52	0	40
29		2	10	74	40	32	52	0	40
30		2	10	239	40	10	0	0	279

Figura 4.6: Dados da solução otimizada para a usina Limoeiro.

Na guia "Visualização de Resultados" da planilha é possível visualizar as variáveis da guia "Resultados" em um dado instante de tempo. Nesta visualização o usuário escolhe o instante de tempo desejado, sendo mostrados somente os resultados relativos ao instante de tempo selecionado. A Figura 4.7 mostra como é feita esta visualização das variáveis energéticas da cascata do rio Pardo.

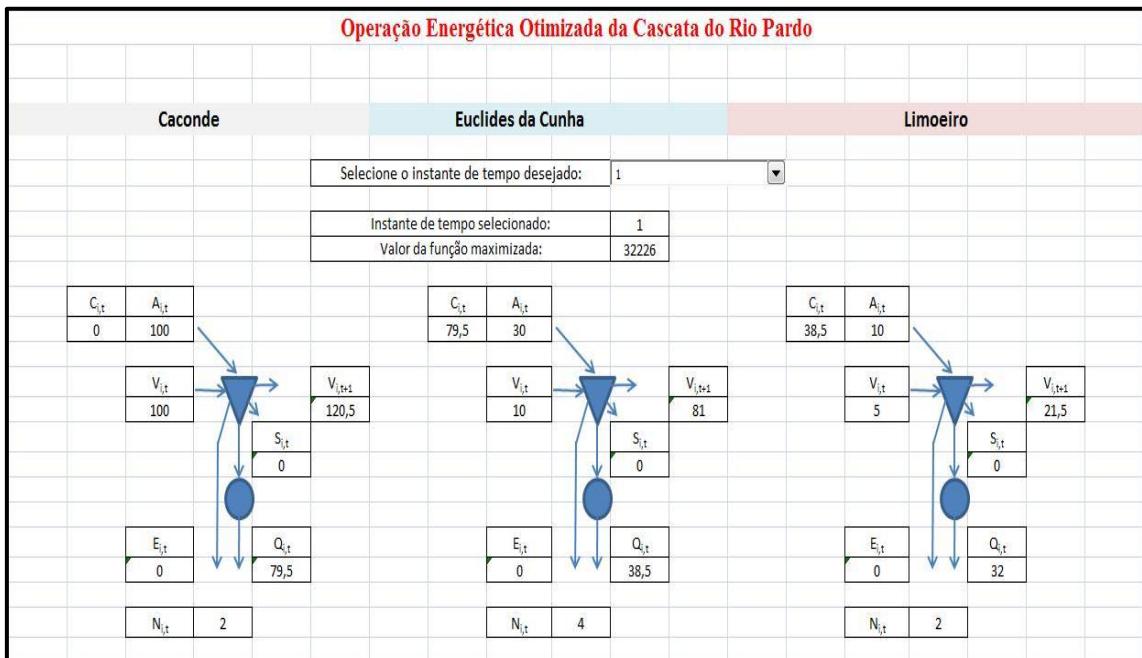


Figura 4.7: Guia Visualização de Resultados para a visualização de dados relativos a um instante de tempo específico.

Após ter sido mostrado todos os resultados obtidos através de tabelas, esta parte do trabalho busca fazer uma análise dos resultados obtidos na otimização. Para maior facilidade de visualização, essa análise será feita através de gráficos das variáveis de controle contínuas.

A Figura 4.8 mostra o resultado obtido para a energia turbinada. Pela figura pode-se observar que as usinas turbinam a menor quantidade de energia possível, de forma a

maximizar as reservas energéticas, sendo Limoeiro a única usina que opera no limite máximo de turbinamento.

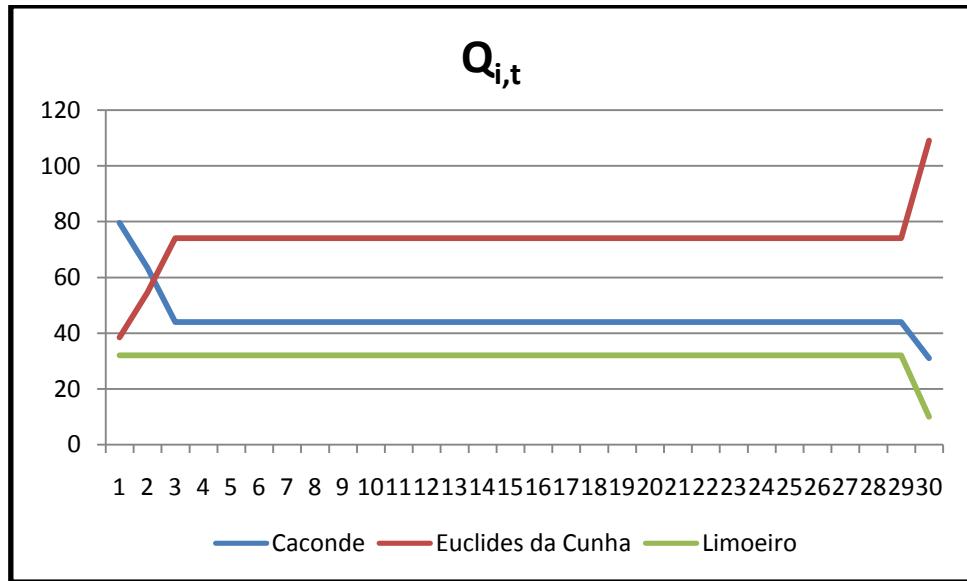


Figura 4.8: Gráfico da energia turbinada versus tempo para as usinas da cascata do rio Pardo.

A Figura 4.9 mostra o resultado obtido para a energia vertida. Pela figura pode-se observar que as usinas não vertem na maioria das vezes, só vertendo quando não é possível mais armazenar energia, atingindo o limite do reservatório, por exemplo. Neste caso, Limoeiro é a usina que apresenta vertimento por ser a última usina da cascata e por possuir um reservatório com pequena quantidade de armazenamento.

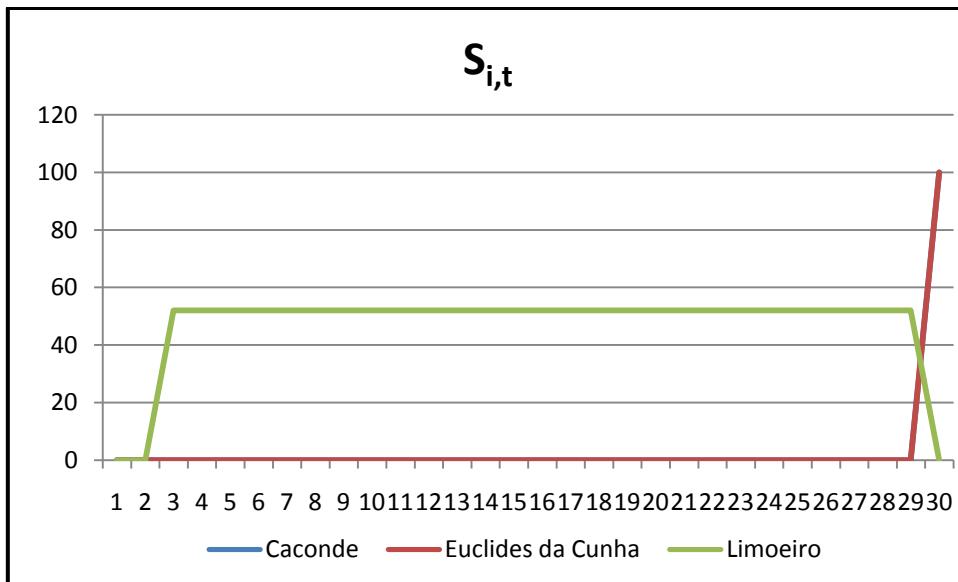


Figura 4.9: Gráfico da energia vertida versus tempo para as usinas da cascata do rio Pardo.

A Figura 4.10 mostra o resultado obtido para a energia desviada. Pela figura pode-se observar que as usinas não desviam na maioria das vezes, só desviando também quando não é possível mais armazenar energia. Observa-se que Limoeiro é a usina que apresenta maior desvio, pelo mesmo motivo dado anteriormente.

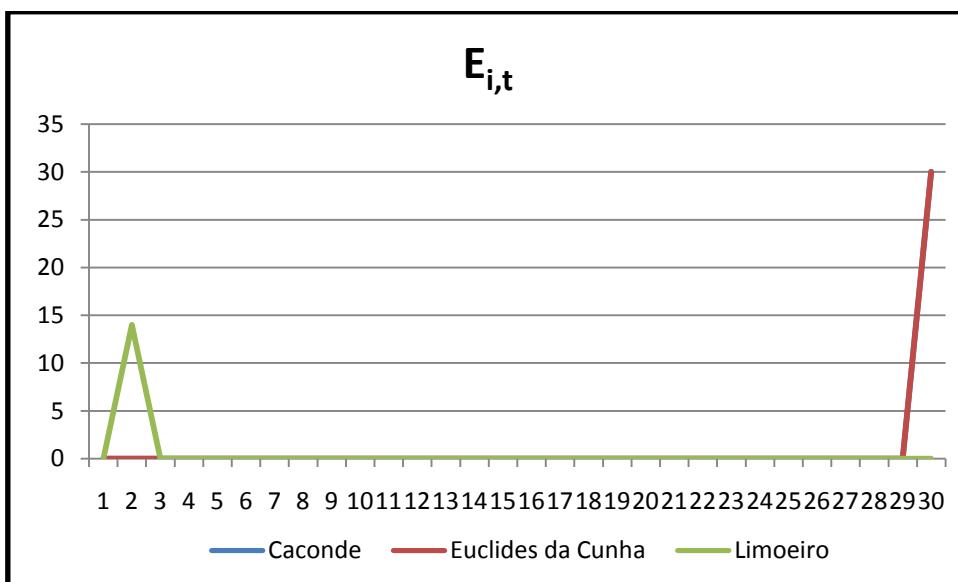


Figura 4.10: Gráfico da energia desviada versus tempo para as usinas da cascata do rio Pardo.

A Figura 4.11 mostra o resultado obtido para a energia armazenada. Pela figura pode-se observar que as usinas tendem a armazenar a maior quantidade de energia possível, chegando em alguns casos no limite máximo de armazenamento. Observa-se pelo gráfico que Euclides da Cunha e Limoeiro armazena o máximo de energia e Caconde tem o seu valor de energia armazenada aumentando ao longo do tempo, o que está em concordância com a função objetivo.

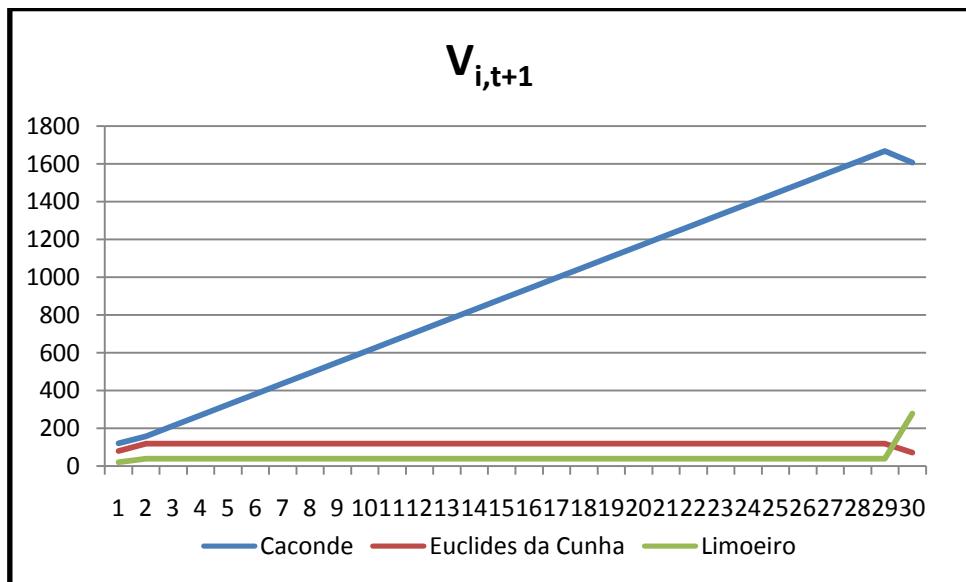


Figura 4.11: Gráfico da energia armazenada versus tempo para as usinas da cascata do rio Pardo.

É importante ressaltar que os resultados estão consistentes com a teoria, porque o sistema só está vertendo e/ou desviando quando a energia armazenada chega ao valor máximo. O sistema também só turbinia a energia necessária, armazenando o restante, o que é consistente com a função objetivo do problema.

Com relação ao número de geradores em funcionamento (fora da manutenção), pode-se observar nos resultados que a solução coloca na maior parte das vezes todos os geradores da usina em funcionamento, o que é consistente com a função objetivo.

Entretanto, existem alguns poucos instantes em que existe gerador em manutenção, o que é ocasionado pelo fato do problema ser um problema degenerado.

4.4 Estudo de Caso

A Tabela 4.2 apresenta os dados de entrada fictícios usados para o estudo de caso do problema de otimização. Esses dados foram utilizados em todos os instantes de tempo. Vale ser ressaltado na tabela que os limites de vertimento máximo e desvio máximo foram colocados com valor zero, de forma a forçar o sistema a não verter ou desviar energia, e sim colocar geradores em manutenção.

Tabela 4.2: Dados de entrada para o estudo de caso do problema de otimização.

	Caconde	Euclides da Cunha	Limoeiro
Energia afluente (MWh)	80	30	0
Energia inicial (MWh)	60	10	5
Energia armazenada mínima (MWh)	60	2	0
Energia armazenada máxima (MWh)	20000	250	200
Energia turbinada mínima (MWh)	0	0	0
Energia turbinada máxima (MWh)	80	110	80
Energia vertida mínima (MWh)	0	0	0
Energia vertida máxima (MWh)	0	0	0
Energia desviada mínima (MWh)	0	0	0
Energia desviada máxima (MWh)	0	0	0
Energia defluente mínima (MWh)	10	10	10
Demandas (MWh)	220		

A Figura 4.12 mostra o resultado obtido para a energia turbinada. Pela figura pode-se observar que as usinas tendem a turbinar a menor quantidade de energia necessária para o funcionamento (de forma a maximizar as reservas energéticas), sendo Limoeiro a única usina que opera no limite máximo de turbinamento.

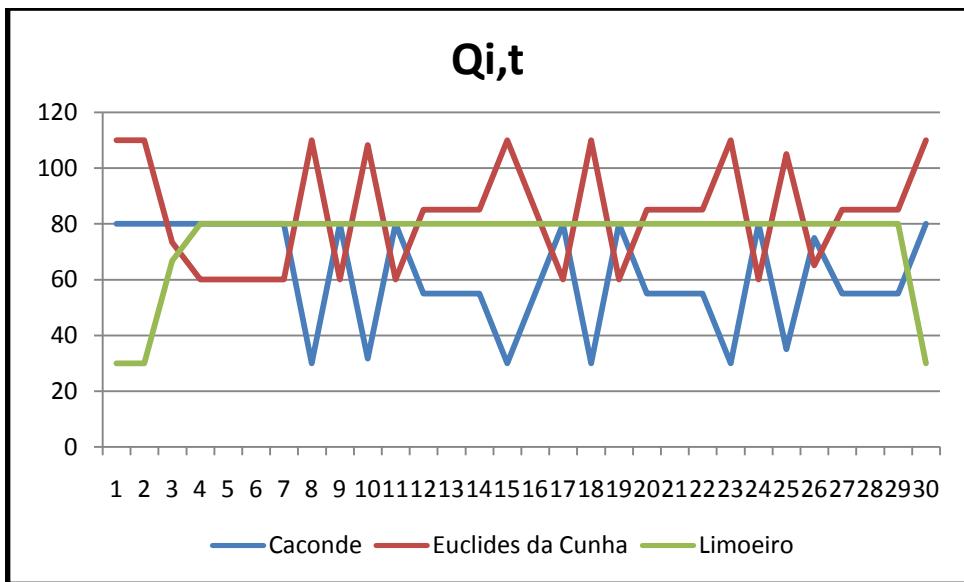


Figura 4.12: Gráfico da energia turbinada versus tempo para as usinas da cascata do rio Pardo utilizando os dados de entrada da Tabela 4.2.

A Figura 4.13 mostra o resultado obtido para a energia armazenada. Pela figura pode-se observar uma flutuação no valor da energia armazenada ao longo do tempo. Entretanto, é interessante observar que Caconde, por ser a usina que possui o maior limite máximo de armazenamento comparado com as outras duas usinas, é a usina que apresenta o maior crescimento de armazenamento de energia ao longo do tempo.

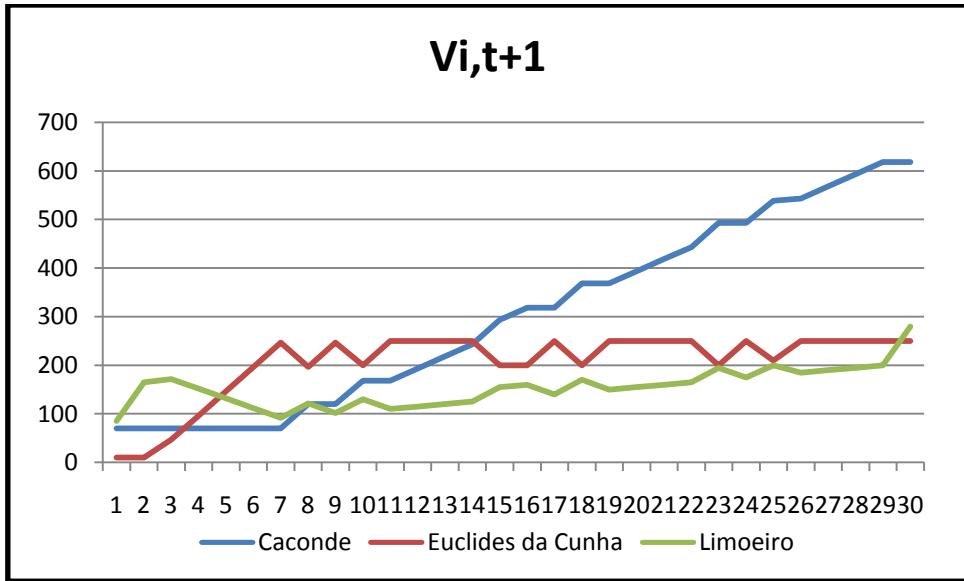


Figura 4.12: Gráfico da energia armazenada versus tempo para as usinas da cascata do rio Pardo utilizando os dados de entrada da Tabela 4.2.

É importante ressaltar que os resultados estão consistentes com a teoria, pois o sistema turbinaria somente a energia mínima necessária, armazenando o restante, o que é consistente com a função objetivo do problema. Neste estudo os valores de energia vertida e energia desviada valem zero ao longo de todo o horizonte de estudo, pois os limites superiores destas variáveis foram colocados como sendo de valor zero.

Com relação ao número de geradores em funcionamento (fora da manutenção), pode-se observar nos resultados que a solução coloca na maior parte das vezes todos os geradores da usina em funcionamento, o que é consistente com a função objetivo. Entretanto, como o sistema foi forçado a não verter nem desviar, em alguns instantes o sistema colocou gerador em manutenção de forma a encontrar a solução ótima para o problema.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÃO

Este trabalho consistiu na modelagem e implementação de um programa para o planejamento da operação da cascata do rio Pardo, em projeto conjunto com a AES Tietê. Foram modeladas no problema todas as restrições relevantes para alcançar a operação otimizada: balanço, manutenção, defluência, turbinamento, vertimento, desvio, armazenamento e demanda. Toda a implementação foi realizada em ambiente Excel, que é um ambiente mais fácil para o programador e mais conhecido para o usuário.

Apesar da modelagem precisa e do porte do problema devido a discretização do horizonte de estudo, a solução é obtida de forma ágil e eficiente, em frações de segundos. Além disso, foi construída uma interface atraente e intuitiva para apresentar os resultados obtidos em um dado instante de tempo selecionado, de forma a facilitar a visualização de resultados pelo usuário. Outro ponto importante é que o otimizador consegue "equalizar" a geração e os volumes, oferecendo uma operação suave e constante. Isso é importante do ponto de vista mecânico (não exige muito das máquinas) e de sistema (porque oferece uma energia constante e confiável, que pode se amoldar à carga).

É importante notar que o modelo foi desenvolvido especialmente para ser utilizado efetivamente pela AES Tietê. Espera-se ter conseguido desenvolver um modelo preciso, confiável e ágil, capaz realmente de auxiliar efetivamente o usuário na tarefa do planejamento da operação para a cascata em questão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] HUMPIRI, C. J. P., *"Estratégias Evolutivas no Planejamento Energético da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Potência"*. Tese de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2005.

[2] CINTRA, C. R., *"Otimização da Operação Integrada das Redes de Gás Natural e de Energia Elétrica em Sistemas Hidrotérmicos"*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

[3] EPE, Empresa de Pesquisa Energética.

Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Consumo%20nacional%20de%20energia%20el%C3%A9trica%20por%20classe%20-%201995-2009.pdf>

Último acesso em 28/11/2010.

[4] EPE, Empresa de Pesquisa Energética, *"Plano Decenal de Expansão de Energia 2019"*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

Disponível

em:

http://www.epe.gov.br/PDEE/PDE2019_03Maio2010_ConsultaPublica.pdf

Último acesso em 28/11/2010.

[5] CAMPOS, A. S. V., *"Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica"*. Projeto de Graduação, DEE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

[6] FORTUNATO, L. A. M. et al., *"Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica"*. 1 ed. Niterói - RJ, Editora da Universidade Federal Fluminense, 1990.

[7] MULLER, G. M., *"Despacho de Máquinas e Geração de Usina Hidrelétrica Individualizada Usando Algoritmos Genéticos"*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

[8] FRACARO, A. V., *"Planejamento da Operação de Curto Prazo de Sistemas Hidrotérmicos com Restrições de Segurança"*. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1996.

[9] FERREIRA, L. R. M., *"Otimização da Operação Energética do Sistema Hidroelétrico do Rio Iguaçu"*. Tese de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1991.

[10] CARNEIRO, A. A. F. M., SILVA, R. M., *"Avaliação da Operação Otimizada de Usinas Hidrelétricas"*. In: 5th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission, pp. 1-9, São Pedro, SP, 2003.

[11] AES Tietê.

Disponível em:

<http://www.aestiete.com.br/>

Último acesso em 28/11/2010.

[12] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico.

Disponível em:

http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx

Último acesso em 28/11/2010.

[13] OLIVEIRA, G. G., "Otimização da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos com Representação Individualizada das Usinas e Afluências Determinísticas". Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1993.

[14] ENCINA, A. S. A., "Despacho Ótimo de Unidades Geradoras em Sistemas Hidrelétricos Via Heurística Baseada em Relaxação Lagrangeana e Programação Dinâmica". Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2006.

[15] PINTO, A. D., "Aplicação de um Mercado Atacadista de Água para Repartição dos Certificados de Energia Assegurada entre usinas Hidrelétricas". Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

[16] OHISHI, T., "Planejamento da Operação de Curto Prazo de Sistemas Hidrotérmicos Predominantemente Hidráulicos". Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1990.

[17] HELP What'sBest!.

[18] *What's Best!*.

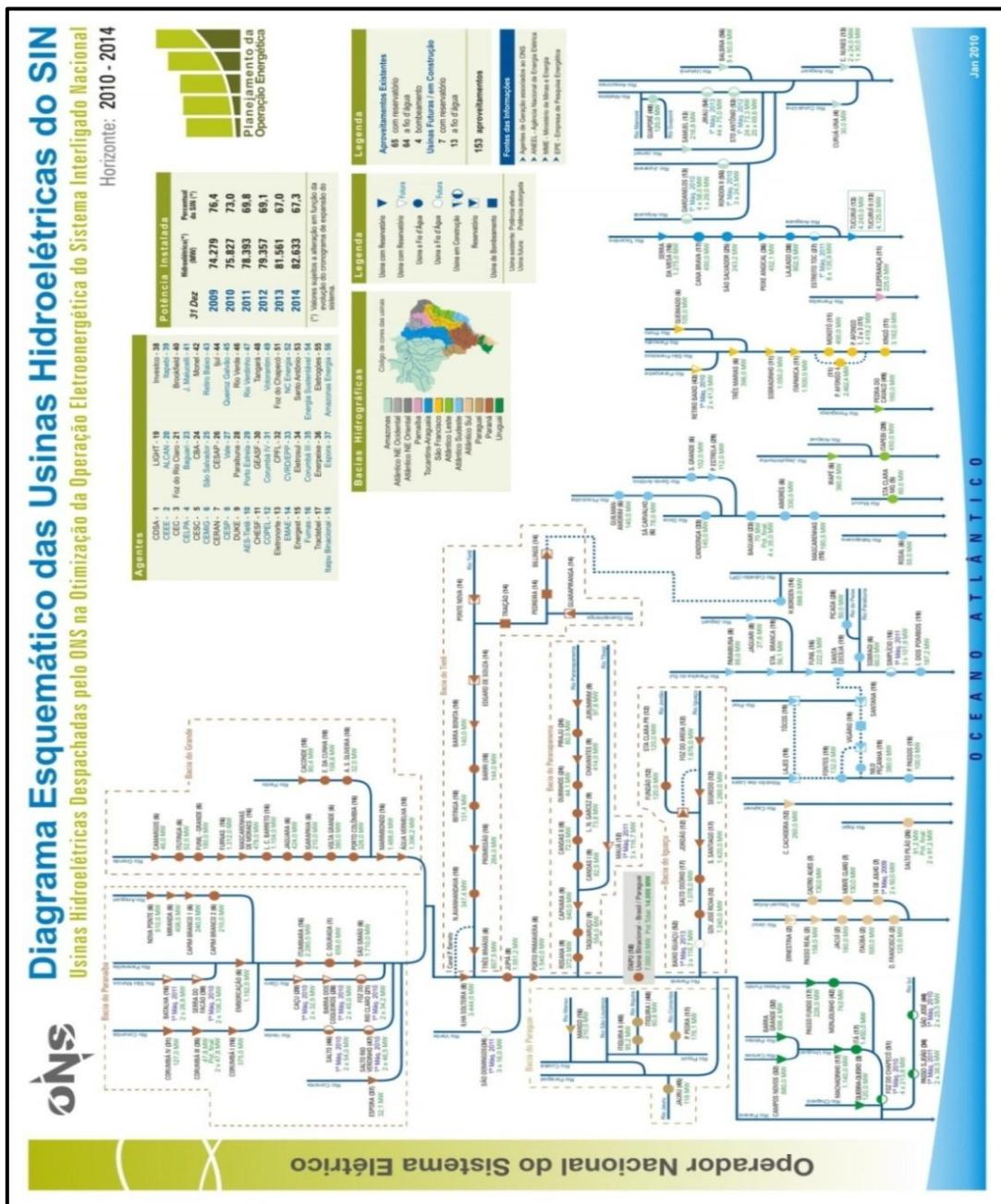
Disponível em:

http://www.lindo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=3&Itemid=11

Último acesso em 14/12/2010.

APÊNDICE A

DIAGRAMA DAS USINAS HIDRELÉTRICAS DO SIN



Fonte: ONS [12]

APÊNDICE B

DADOS DAS USINAS DA CACATA DO RIO PARDO

B.1. Caconde

Entrada em operação: 1966

Localização: Rio Pardo - Rod. Caconde-Divinolândia, km 293 - Caconde (SP)

Reservatório: área de 31 km² e volume de 636 x 10⁶ m³

Barragem: tipo Terra, comprimento de 640 m

Turbina: tipo Francis de eixo vertical, queda bruta de 105 m

Gerador: tipo Umbrella de eixo vertical e potência total de 80,4 MW

Vertedouro: tipo comporta de superfície e descarga total de 852 m³/s

tipo comporta de fundo e descarga total de 200 m³/s

tipo Tulipa e descarga total de 726 m³/s

Número de Turbinas: 2

Número de Circuitos: 2

Tensão Nominal: 138 kV

Cota Máxima Útil: 855,00 m

Cota Mínima Útil: 825,50 m

Volume Útil de Água Acumulado: 540 x 10⁶ m³

Não tem eclusa

B.2. Euclides da Cunha

Entrada em operação: 1960

Localização: Rio Pardo - Rod. Mocóca/São José do Rio Pardo, km 5 - São José do Rio Pardo (SP)

Reservatório: área de 1 km² e volume de 18,45 x 106 m³

Barragem: tipo Terra, comprimento: 312 m

Turbina: tipo Francis de eixo vertical, queda bruta de 92 m

Gerador: tipo Umbrella de eixo vertical e potência total de 108,8 MW

Vertedouro: tipo Comporta de superfície e descarga total de 2.054 m³/s
tipo Tulipa e descarga total de 990 m³/s

Número de Turbinas: 4

Número de Circuitos: 8

Tensão Nominal: 138 kV

Cota Máxima Útil: 665,00 m

Cota Mínima Útil: 659,50 m

Volume Útil de Água Acumulado: 4.680 m³

Não tem eclusa

B.3. Limoeiro

Entrada em operação: 1958

Localização: Rio Pardo - Rod. Casa Branca-Mocóca, km 258 - Mocóca (SP)

Reservatório: área de 3,3 km² e volume de 34,13 x 106 m³

Barragem: tipo Terra, comprimento: 600 m

Turbina: tipo Kaplan de eixo vertical, queda bruta de 25,5 m

Gerador: tipo Umbrella de eixo vertical e potência total de 32 MW

Vertedouro: tipo Comporta de superfície e descarga total de 1.764 m³/s

tipo Comporta de superfície (suplementares) e descarga total de 1.220 m³/s

Número de Turbinas: 2

Número de Circuitos: 4

Tensão Nominal: 138 kV

Cota Máxima Útil: 577,50 m

Cota Mínima Útil: 563,00 m

Volume Útil de Água Acumulado: 25.160 m³

Não tem clausa

Fonte: AES Tietê [11]

APÊNDICE C

WHAT'SBEST!

C.1. Considerações iniciais

O *What'sBest!* 9.0 torna disponível para o seu programa Excel um solver altamente desenvolvido capaz de realizar otimização linear, inteira ou não-linear para o mais difícil dos problemas. O *What'sBest!* da acesso a este solver a partir do Excel e pode ser executado diretamente como pelo *Visual Basic*.

Pessoas de diversas campos, tais como negócios, finanças, ciência e matemática podem usar o *What'sBest!* para modelar e resolver problemas na produção, planejamento financeiro, programação de pessoal, alocação de recursos, gerenciamento de portfólio, corte de estoque, controle de estoque, etc.

C.2. Visão geral da instalação do What'sBest

Para começar a trabalhar rapidamente, primeiro feche todos os programas e simplesmente execute *setup.exe* a partir do desktop do Windows ou a partir do CD e siga as instruções nas caixas de diálogo que se seguem.

O programa oferece configuração padrão e de instalação especificadas. A opção de instalação padrão analisa o sistema de informação crítica necessária para instalar com êxito *What'sBest!*. Quando você selecionar padrão como o tipo de instalação na caixa de diálogo inicial, o arquivo é copiado em um diretório intitulado Biblioteca dentro do diretório principal do Excel.

A opção de instalação especificada está disponível para situações que exigem mais informações do usuário e para os usuários que preferem controlar os detalhes da instalação. A instalação padrão é recomendada para a maioria dos ambientes.

Como última etapa na instalação do *What'sBest!*, uma planilha em Excel será aberta e você encontrará uma nova barra de ferramentas (*What'sBest!*) e um novo menu (WB!) específico para o programa *What'sBest!*.

Pode ser solicitado para uma chave de licença a primeira vez que o software é executado. Deve-se introduzir a chave de licença exatamente como aparece, incluindo todos os hífens.

Na versão 2007 do Excel, o menu e as barras de ferramentas do *What'sBest!* aparecem conforme mostrado na Figura C.1.

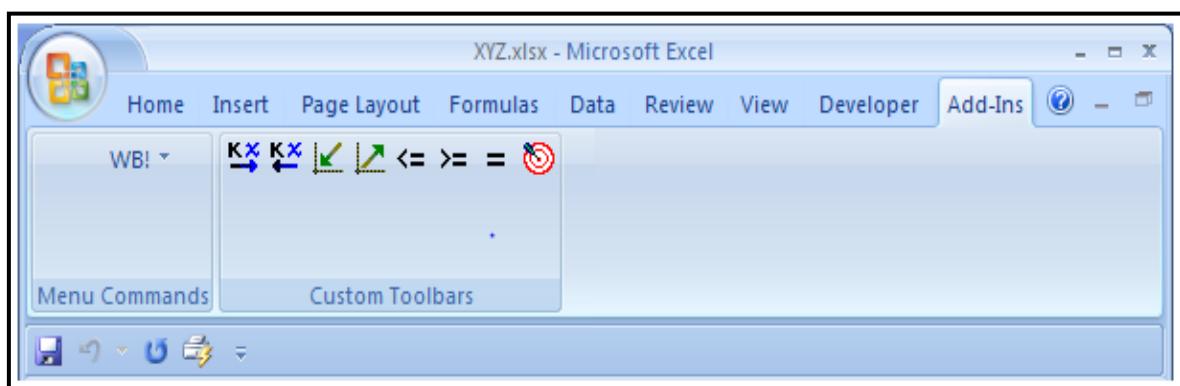


Figura C.1: Visualização do menu e das barras de ferramentas do *What'sBest!* no Excel 2007.

C.3. Tipos de modelo

C.3.1. Modelos otimizáveis

A otimização te ajuda a encontrar a resposta que produz o resultado mais desejável, ou seja, aquele que alcança o maior lucro ou aquele que atinge o menor custo, por exemplo.

Os problemas de otimização são classificados como lineares ou não lineares, dependendo se as relações do problema são lineares com relação às variáveis de controle. O *What'sBest!* pode resolver ambos os problemas, com restrições inteiras opcionais.

C.3.2. Modelos não- optimizáveis

Os modelos não-otimizáveis não tem uma função objetivo a ser maximizada ou minimizada. O propósito de tais modelos é resolver uma equação. O *What'sBest!* pode encontrar valores que satisfaçam os conjuntos de equações ou satisfaçam referências circulares. Da mesma forma, o *What'sBest!* pode encontrar valores para conseguir o resultado desejado, comumente chamado de meta de busca. O exemplo de modelo de fluxo de rede é um exemplo de um modelo não-otimizável.

C.3.3 Modelos com restrições inteiras

Os usuários tem frequentemente a necessidade de encontrar respostas que consistem em unidades inteiras. Por exemplo, na programação de pessoal, o uso mais eficiente dos trabalhadores pode ser de 2,37 pessoas, mas é difícil encontrar 0,37 de uma pessoa para um trabalho significativo. Portanto, o *What'sBest!* permite ao usuário restringir os valores a serem números inteiros.

C.4. Os passos principais para a solução de um problema

Existem três etapas para a criação de um modelo a ser resolvido pelo *What'sBest!*. A Figura C.2 mostra o menu e as barras de ferramentas do *What'sBest!* na versão 2007 do Excel, com as barras de ferramentas que são usadas para a criação do modelo destacadas em vermelho para posterior explicação do significado de cada uma delas.

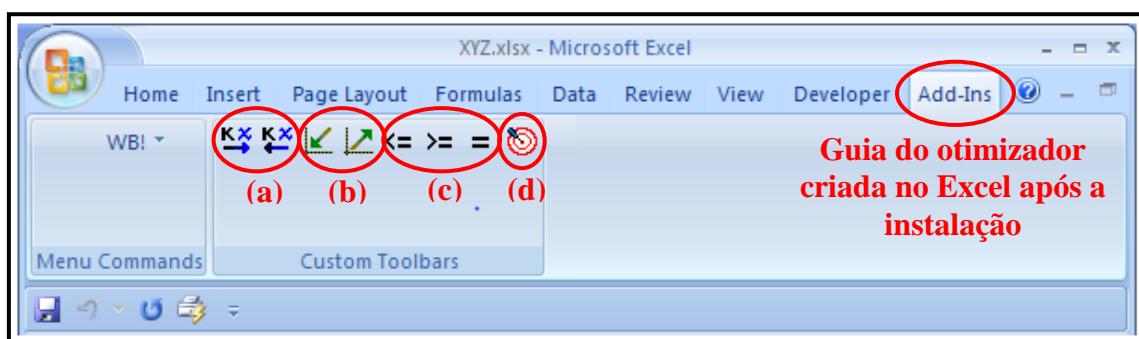


Figura C.2: Identificação da barra de ferramenta do *What'sBest!* no Excel 2007.

Segue abaixo a identificação dos itens da barra de ferramentas, destacadas em vermelho na Figura C.2.

- (a) Determinação de células ajustáveis: as células ajustáveis são as células da planilha que o *What'sBest!* pode ajustar na busca pela solução ótima. Em termos de programação

matemática, estas são chamadas de variáveis. O primeiro botão aplica a ajustabilidade nas células e o segundo botão remove a ajustabilidade das células.

- (b) Definição da solução ótima: é utilizado para maximizar ou minimizar uma célula ajustável ou alguma função de células ajustáveis. O *What'sBest!* permite apenas uma melhor solução para o modelo. O primeiro botão minimiza a função objetivo e o segundo botão maximiza a função objetivo.
- (c) Especificação das restrições: as células de restrição identificam as limitações de um modelo. Por exemplo, "matérias-primas utilizadas na produção deve ser menor ou igual a matérias-primas na mão". O primeiro botão indica o sinal menor ou igual para ser usado nas restrições de desigualdade, o segundo botão indica o sinal maior ou igual para ser usado nas restrições de desigualdade e o terceiro botão indica o sinal igual para ser usado nas restrições de igualdade.
- (d) Resolver o problema: encontra a melhor resposta para o problema.

Maiores informações sobre o *What'sBest!* em [17-18].