

Universidade Federal de Goiás
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Doutorado em Ciências Ambientais

**Inserção de Variáveis Ambientais no Planejamento
da Operação de Sistemas Hidrotérmicos**

Ana Cláudia Marques do Valle

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria do Amparo Albuquerque Aguiar

Co-orientador: Prof^o. Dr. Gélson da Cruz Júnior

Goiânia

2008

Ana Cláudia Marques do Valle

***Inserção de Variáveis Ambientais no
Planejamento da Operação de Sistemas
Hidrotérmicos***

Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Ciências Ambientais da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal de Goiás, para obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Ciências Ambientais

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria do Amparo Albuquerque Aguiar

Co-orientador: Prof^o. Dr. Gélson da Cruz Júnior

Goiânia

2008

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(GPT/BC/UFG)

Valle, Ana Cláudia Marques do.
V181i Inserção de variáveis ambientais no planejamento da
operação de sistemas hidrotérmicos [manuscrito] / Ana Cláudia
Marques do Valle. – 2008.
146 f. : il., color., figs., tabs.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria do Amparo Albuquerque
Aguiar; Co-Orientador: Gelson da Cruz Júnior.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Goiás. Pró-
Reitoria
de Pesquisa e Pós-Graduação. Programa de Doutorado em
Ciências Ambientais, 2008.

Bibliografia: f. 142-146.

Anexos.

1. Geração de Energia Elétrica 2. Qualidade da Água
3. Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos 4.
Clorofila-a I. Aguiar, Maria do Amparo Albuquerque II. Cruz
Júnior, Gelson da, III. Universidade Federal de Goiás. Pró-
Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação. **Programa de**
Doutorado em Ciências Ambientais
IV. Título.

CDU: 621.315



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DOUTORADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Membros da Banca Examinadora de Defesa Pública de Tese de
Doutorado em Ciências Ambientais, realizada em 11 de fevereiro de
2008.

Prof^ª. Dr^ª. Maria do Amparo Albuquerque Aguiar - UFG

Prof. Dr. Leandro Gonçalves Oliveira - UFG

Prof^ª. Dr^ª. Ina de Souza Nogueira - UFG

Prof^ª. Dr^ª. Denise Garcia de Santana - UFV

Prof. Dr. Leonardo Nepomuceno – UNESP

Para Alexandre Marques do Valle, meu filho.

Agradecimentos

Á Deus pela oportunidade à vida, à saúde física e mental, pelas oportunidades e por esta conquista.

À CESP – Companhia Energética do Estado de São Paulo, pelas informações cedidas, imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho. Por acreditar na pesquisa e no compromisso ético dos pesquisadores.

Aos meus pais, Mauro Ribeiro do Valle e Maria Amélia Marques do Valle, pelo empenho, carinho, esforço, apoio e aos quais atribuo o mérito dessa realização.

À minha irmã Paula Andréa do Valle Hamberger por acreditar e pela amizade.

À minha sobrinha Yohanna do Valle Hamberger pelo amor incondicional.

À Professora Dr^a. Maria do Amparo Albuquerque Aguiar, uma grande amiga, minha orientadora, por sua amizade, dedicação, confiança e pela oportunidade de realizar um sonho.

Ao Professor Dr. Gelson da Cruz Junior, meu co-orientador, pelo carinho, atenção e amizade.

Aos meus amigos da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação e, da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.

Ao corpo docente do Doutorado em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Goiás.

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma modelagem para inserção de restrição de qualidade de água ao planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos de longo prazo. Considerar a qualidade da água no planejamento garante, o enfoque do uso múltiplo da água. O objetivo deste é explorar a sensibilidade do planejamento de sistemas hidrotérmicos à inserção de uma variável ambiental, focando a qualidade da água. Dentre os indicadores de qualidade da água, a escolha foi pela clorofila-a e aporte de fósforo estabelecendo uma relação com o volume do reservatório.

Abstract

This work presents the development of a model that applies water quality restriction to the long term planning hydrothermal power system operation. Taking water quality into account in the long term planning, guarantees the multiple water usage. The objective is to exploit the sensibility of the long term planning hydrothermal power system to the environmental variable aiming water quality. Among the water quality indicator the option was chlorophyll-a, the nutrient phosphorous establishing a relation with the reservoir volume.

Sumário

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Sumário	v
Lista de tabelas	viii
Lista de figuras	x
1- Introdução	1
2 - Matriz Energética	6
2.1- Cenário mundial de reservas petrolíferas	8
2.2- Fontes alternativas de energia	9
2.2.1- Biomassa	10
A- Biodiesel	10
A.1- Vantagens da inserção do biodiesel na matriz energética brasileira	12
B- Etanol	16
2.2.2- Solar	19
2.2.3- Eólica	20
2.3- Geração de energia elétrica no Mundo	20
2.4- Geração de energia elétrica no Brasil	21
2.5- Geração de energia no estado de Goiás	24
2.6- Balanço Energético do estado de Goiás	25
2.6.1- Energia Primária no estado de Goiás	26
2.6.2-Consumo de energia no estado de Goiás	26
2.6.3-Auto-suficiência de energia do estado de Goiás	27
2.6.4-Matriz energética do estado de Goiás	28
2.6.5-Potencial hidrelétrico, Termelétrico e solar do estado de Goiás	29
2.6.6-Dados do desenvolvimento do estado de Goiás	29
2.7- Comparação das fontes de energia quanto à emissão de carbono	30

2.8- Comparação das fontes de energia quanto ao custo do MWh gerado	33
2.9- Desmatamento versus usinas hidrelétricas	35
3- Energia Hidráulica: Operação de Reservatórios	38
3.1- Reservatórios	39
3.2- Qualidade da água	42
3.2.1- Índices de Qualidade	45
A- Índice de estado trófico (IET)	47
B- Índice de comunidades aquáticas – fitoplâncton e Índice de comunidade fitoplanctônica com o IET	48
3.3- Monitoramento de algas para determinar a qualidade da água	52
3.4- Conseqüências da alteração da qualidade da água	56
3.4.1- Florações identificadas	59
3.5- Algumas análises de qualidade da água em função de variáveis químicas	60
3.6- Análises de algumas modelagens implementadas por diferentes pesquisadores	61
3.7- Diversidade de Zooplâncton	66
4 - Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos	68
4.1- Modelagem para gerenciamento de reservatórios	69
4.2- Problema do planejamento da operação	71
4.3- Modelo equivalente	73
4.3.1- Sistemas Hidrotérmicos de Geração	73
A- Usinas Hidrelétricas	74
B- Usinas Termoelétricas	77
4.4- Formulação do problema de planejamento da operação energética	78
4.5- Despacho econômico termelétrico	80
4.6- Problema hidráulico	81
4.7- Modelagem de Sistemas de reservatório	82
4.8- Restrição ambiental	83
5- Inclusão da Variável Ambiental no Planejamento da Operação de Sistemas – Estudo de Casos	86
5.1- Material e Métodos	86

5.2- Resultados	88
5.2.1- Polinômio clorofila-a = f(volume útil, fósforo)	88
5.2.2- A restrição de clorofila-a no software de planejamento da operação	96
 6- Conclusões	 105
 Anexo 1 Precipitação Pluviométrica	 109
Anexo 2 Pontos Amostrados	112
Anexo 3 SAPE	115
Anexo 4 Análises estatísticas de algumas variáveis físico-químicas e volume útil do reservatório	 118
Anexo 5 Restrição Operativa das Usinas Simuladas	124
Referência Bibliográfica	128

Capítulo 2

Tabela 2.1- Cultura Girassol, dados CNA 2006	14
Tabela 2.2- Empreendimentos em operação, construção e outorga, ano 2006	22
Tabela 2.3- Empreendimentos em operação relacionados à matéria prima	23
Tabela 2.4- Percentual de tipo de combustível utilizado em empreendimentos em operação e construção (excluído o referente à hidráulica)	23
Tabela 2.5- Resumo da situação atual dos empreendimentos de geração de energia em Goiás	25
Tabela 2.6- Consumo de energia por setor em Goiás	27
Tabela 2.7- Consumo de energia por fonte em Goiás	27
Tabela 2.8- Emissão de CO ₂ a partir da queima de combustíveis fósseis durante o ano 2004	31

Capítulo 3

Tabela 3.1- Critério de classificação do estado trófico da água segundo o IET	48
Tabela 3.2- Categorias de qualidade da água, utilizando clorofila-a	49
Tabela 3.3- Categorias de qualidade da água, utilizando IET	49

Capítulo 4

Tabela 4.1 - Evolução da distribuição das usinas hidrelétricas nas regiões Hidrográficas	75
--	----

Capítulo 5

Tabela 5.1- Coeficientes do polinômio anual clorofila= $f(\text{fósforo, volume útil})$ da usina de Ilha Solteira	90
Tabela 5.2- Coeficientes do polinômio anual clorofila= $f(\text{fósforo, volume útil})$ da usina de Ilha Solteira	91
Tabela 5.3- Coeficientes do polinômio anual Log clorofila= $f(\text{Log fósforo, delta volume útil})$ da usina de Ilha Solteira	92
Tabela 5.4- Usina de Ilha Solteira, Log clorofila= $f(\text{Log fósforo, delta volume útil})$ polinômio genérico e polinômios de seca e chuva	93
Tabela 5.5- Coeficientes do polinômio anual clorofila= $f(\text{fósforo, volume útil})$	

da usina de Três Irmãos	94
Tabela 5.6- Coeficientes do polinômio anual clorofila= $f(\text{fósforo, volume útil})$ da usina de Três Irmãos	95
Tabela 5.7- Usina de Três Irmãos, Log clorofila= $f(\text{Log fósforo, delta volume útil})$ polinômio genérico e polinômios de seca e chuva	96
Tabela 5.8- Polinômio genérico e polinômios de seca e chuva aplicados na simulação Log clorofila= $f(\text{Log fósforo, delta volume útil})$, valores de superfície	98
Tabela 5.9- Polinômio genérico e polinômios de seca e chuva aplicados na simulação Log clorofila= $f(\text{log fósforo, delta volume útil})$, valor médio das duas primeiras profundidades	98
Tabela 5.10- Valores obtidos quando da inclusão do polinômio de restrição ambiental para a simulação da cascata do Rio Paraná. (utilizando o polinômio de superfície da tabela 5.8)	103

ANEXO 4

Tabela 1 : Levantamento para usina de Ilha Solteira, mês de chuva	121
Tabela 2 : Levantamento para usina de Ilha Solteira, mês de seca	121
Tabela 3 : Levantamento para usina de Ilha Solteira, mês de chuva	121
Tabela 4 : Levantamento para usina de Ilha Solteira, mês de seca	122
Tabela 5: Levantamento para usina de Três Irmãos, mês de seca	122
Tabela 6: Levantamento para usina de Três Irmãos, mês de chuva	122
Tabela 7 : Levantamento para usina de Três Irmãos, mês de chuva	122
Tabela 8: Levantamento para usina de Três Irmãos, mês de seca	123

Capítulo 2

Figura 2.1- Relação área plantada por safra para o Brasil	15
Figura 2.2 - Relação área plantada por safra para o estado de Goiás	15
Figura 2.3 - Área atual de produção de cana-de-açúcar	18
Figura 2.4 - Perspectiva de expansão de produção de cana-de-açúcar (áreas circuladas)	19
Figura 2.5 - Oferta de energia interna de eletricidade, 2005	24
Figura 2.6 – Localização de usinas hidrelétricas (UHEs) e desmatamento 2003-2005 em Goiás	36
Figura 2.7 – Localização de usinas hidrelétricas (PCHs) e desmatamento 2003-2005 em Goiás	36
Figura 2.8 – Localização de usinas termelétricas e desmatamento 2003-2005 em Goiás	37

Capítulo 4

Figura 4.1- Processo de tomada de decisão em sistemas hidrotérmicos	69
Figura 4.2 – Variáveis representadas na modelagem de uma cascata	73
Figura 4.3: Esquema de uma usina hidrelétrica	76

Capítulo 5

Figura 5.1- Energia armazenada simulação cascata Paraná, com Ilha Solteira e Porto Primavera, comparação resultados com polinômio genérico e caso base	100
Figura 5.2- Energia armazenada simulação cascata Paraná, com Ilha Solteira e Porto Primavera, comparação resultados do caso base com polinômio de chuva e seca	100
Figura 5.3- Geração Hidráulica simulação cascata Paraná, com Ilha Solteira e Porto Primavera, comparação resultados com polinômio genérico e caso base	101
Figura 5.4- Geração Hidráulica simulação cascata Paraná, com Ilha Solteira e Porto Primavera, comparação resultados do caso base com polinômio de chuva e seca	101

ANEXO 1

Figura A1.1: Evolução da Precipitação Pluviométrica - Porto Primavera - 2000/2005	110
Figura A1.2: Evolução da Precipitação Pluviométrica - Ilha Solteira - 2000/2005	110

Figura A1.3- Evolução da Precipitação Pluviométrica - Três Irmãos - 2000/2005	111
---	-----

ANEXO 3

Figura A3.1- Tela inicial do Software SAPE 2007	116
Figura A3.2- Tela para escolha do cenário a ser simulado, Software SAPE	116
Figura A3.3- Tela para simulação do caso base, Software SAPE 2007	117
Figura A3.4- Tela para simulação do caso com a inclusão da variável ambiental, Software SAPE 2007	117

Capítulo 1

Introdução

A busca pela diversificação da matriz energética se deve a extinção em médio prazo do petróleo e à conscientização da necessidade da redução da devastação ambiental. Além disso, as restrições ambientais estão cada vez mais severas, o que obriga a utilização mais consciente dos recursos e aproveitamento dos resíduos agrícolas e industriais.

O Brasil possui tradição na utilização de fontes renováveis. A matriz energética brasileira é composta de 40% da energia originada do petróleo e seus derivados, 29,7% de biomassa, 15% de hidráulica, 9,3% de gás natural, 6,4% de carvão mineral e 1,2% de urânio (MME, 2006). A matriz energética brasileira pode ser considerada uma das mais limpas do mundo, cerca de 35,9% da energia fornecida no Brasil é de origem renovável; no mundo esse percentual é de 13,5% e nos Estados Unidos é de 4,3% (PIRES et al, 2006).

As fontes renováveis em maior destaque no Brasil são a biomassa e hidráulica. O potencial brasileiro dessas duas formas de fonte de energia é enorme. A utilização da biomassa como fonte está crescendo tanto no que se refere aos recursos extraídos dos produtos agropecuários, como também à utilização de resíduos industriais. A hidroeletricidade e a biomassa para geração de energia são as formas de maior atratividade econômica.

A energia elétrica se caracteriza como uma fonte de energia largamente versátil, o que fez com que sua utilização aumentasse significativamente ao longo das últimas décadas. A relação oferta versus demanda de energia elétrica, a curto prazo, é estável, porém em função das restrições à expansão da oferta, não se manterá por muito tempo (PIRES et al, 2006). Consequentemente, os sistemas elétricos de potência, responsáveis pelo fornecimento de energia consumida, passaram a ocupar posição de fundamental importância.

A complexidade e os elevados custos envolvidos na gestão de todos os equipamentos utilizados na geração de energia elétrica têm sido responsáveis por esforços significativos de profissionais de áreas diversas para operar e expandir o sistema, de forma a garantir o atendimento da demanda dentro dos critérios de qualidade de suprimento de energia com os menores custos e menores danos ambientais. Tem-se então, a necessidade do planejamento da operação do sistema hidrotérmico de forma a garantir o atendimento dos critérios de

qualidade tanto do setor elétrico, como da área ambiental, critérios esses que normalmente são antagônicos. Este sistema representa 76,13% dos empreendimentos em operação que utilizam a água como combustível. Um planejamento eficiente que atenda aos critérios de qualidade desse combustível, cada vez mais escasso e valioso, é de fundamental relevância para a humanidade e ambientalistas. É eminente a necessidade de um planejamento de recursos hídricos, mais especificamente, o planejamento da operação de sistemas de geração de energia incluindo a análise da qualidade do combustível, água.

O planejamento dos recursos hídricos visa à antecipação dos problemas potenciais, numa perspectiva de possibilitar a otimização dos recursos financeiros a serem aplicados para solução desses problemas. Significa a escolha da melhor solução que permita o atendimento das diferentes necessidades de uso da água; que garanta a conservação do meio ambiente e dos recursos hídricos.

A água é cada vez mais alvo de estudos e preocupação da humanidade, tanto no que se refere a sua disponibilidade quanto a sua qualidade. O gerenciamento e planejamento de recursos hídricos são, portanto, fundamentais à expansão e operação dos sistemas de reservatório de acumulação que servem aos mais variados usos visando à satisfação das necessidades humanas, das demandas vinculadas às atividades econômicas e sociais e ao atendimento dos critérios de qualidade da água associado aos usos múltiplos.

As múltiplas atividades humanas desenvolvidas nas bacias hidrográficas, contribuem para a deterioração dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Isto ocorre devido à deposição inadequada de resíduos (nutrientes e poluentes), provenientes de despejos domésticos e industriais e resíduos do tratamento de diversos tipos de culturas agrícolas. Esses fatores podem ocasionar a eutrofização de reservatórios; podem aumentar a carga de sedimentos depositados e promover a concentração de metais pesados e, outros elementos tóxicos (ALMEIDA, 2002).

É essencial, portanto, que haja um planejamento da utilização dos recursos hídricos, que vise, dentre vários objetivos à satisfação das necessidades de água, o seu uso racional, o combate à poluição e aos déficits crônicos, a prevenção e gestão de situações de crise (cheia, seca e poluição) e a valorização do ambiente, em particular, a conservação dos ecossistemas.

O planejamento deve contemplar a análise de estratégias de desenvolvimento socioeconômico do país, ou região, considerando horizontes temporais relativamente significativos e regiões específicas do nosso território nacional. Deve ser desenvolvido e aplicado de forma dinâmica e adaptável às condições passíveis de evolução objetiva, pois

caracteriza um processo que está em contínua atualização. O planejamento possibilita ainda que haja participação no processo de tomada de decisão e de gestão dos recursos.

Os objetivos que envolvem com mais frequência os processos de gestão e planejamento de sistemas de recursos hídricos são os benefícios econômicos produzidos por esses sistemas, a nível nacional, regional ou local. Esses benefícios podem estar vinculados à: suprimento de água para irrigação, industrial e/ou urbano; energia elétrica; navegação; controle de cheias, recreação e lazer.

No planejamento de recursos hídricos devem ser levados em conta estudos integrados usando modelos climáticos, hidrológicos e socioeconômicos, considerando na decisão as várias alternativas na análise custo benefício. Deve-se considerar a inseparabilidade entre a disponibilidade e a procura e, que o ciclo hidrológico não está limitado por fronteiras políticas (RAMOS, 2003). Ter-se-á sempre em mente que os modelos climáticos e hidrológicos ainda não permitem previsão exata de uma situação de seca ou de cheia.

No início na década de 70 e 80, frente ao número expressivo de usinas em funcionamento e construção, teve início a busca de metodologias para o planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos com reservatórios de acumulação. Havia então demanda por ferramentas e técnicas de modelagem de operação de sistemas hidrotérmicos, visando o planejamento de recursos hídricos. Nos processos de expansão e operação de sistemas de reservatório se faz necessário uma avaliação da potencialidade do sistema e da melhor forma de operação.

Os primeiros trabalhos focavam principalmente o setor elétrico, no que tange a geração e transmissão de energia elétrica. Mais recentemente, a preocupação e a conscientização ambiental levaram à estudos focando uso múltiplo e qualidade da água.

Vários trabalhos foram realizados com o objetivo de desenvolver modelos de análise de sistemas de reservatórios para geração de energia elétrica (CRUZ, 1998; VINHAL, 1994), no qual foram empregadas as mais variadas técnicas para solução do problema; programação linear, programação não-linear, programação dinâmica, entre outras, cujo foco único era o setor elétrico.

Brandão (2004) apresentou um modelo para a operação de reservatórios para geração de energia elétrica focando o uso múltiplo da água, mais especificamente a irrigação. O objetivo era garantir que as demandas para geração e irrigação fossem atendidas nos reservatórios em estudo (BRANDÃO, 2004).

Dentro do planejamento da operação de usinas a base de dados do sistema engloba as características de utilização do recurso hídrico como combustível essencial para a produção

da energia elétrica e atendimento à demanda de energia elétrica, para um dado cenário espaço temporal.

O planejamento da operação de usinas parte de uma análise e diagnóstico da situação de referência, comumente tratada como caso base. São definidos os objetivos a curto, médio e longo prazo, que se vincula à interação da série hidrológica e a demanda de energia.

Com o intuito de minimizar a diferença entre os valores simulados e o caso real simulações deve-se caracterizar a incerteza, estabelecer intervalos de predição e avaliar os métodos propostos para trabalhar com a incerteza, uma análise estatística probabilística.

Essas incertezas se caracterizam pela: aleatoriedade dos processos físicos (cheias, escoamento, seca); incerteza dos parâmetros, decorrente de amostras limitadas; erros de medição entre outras; e incerteza na definição do modelo ou modelos que melhor se ajustam à realidade.

Alguns métodos podem ser aplicados com o objetivo de lidar com a incerteza. São utilizadas séries sintéticas, obtidas a partir de uma série histórica, que permitem testar a solução ótima para diversos “futuros hidrológicos”. Podem também ser realizadas análises de sensibilidade e aplicar teoria de decisão no processo de planejamento.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver metodologia para o planejamento da operação de reservatórios contemplando a qualidade da água. Com o objetivo de minimizar os efeitos nocivos à qualidade da água, mais especificamente a eutrofização, criados pelo setor de geração de energia elétrica. Neste sentido optou-se, baseando-se na experiência de vários profissionais da área de qualidade da água, pela utilização do indicador clorofila-a (CARVALHO, 2003; PEREIRA, 2003; WALKER, 2005; MARIANI, 2006) para esta análise. Os níveis de clorofila-a nos corpos d’água são regulamentados pelo CONAMA (MMA, resolução CONAMA 357, pág. 10).

A disposição da tese é mostrada a seguir. O capítulo 1 apresenta a introdução ao assunto a ser desenvolvido.

O capítulo 2 apresenta a matriz energética brasileira e a goiana, a situação atual e seu potencial de desenvolvimento, focando principalmente as fontes de energia renováveis.

O capítulo 3 versa sobre a qualidade da água. Apresenta um levantamento de trabalhos desenvolvidos sobre a qualidade da água e qual a variável escolhida a ser aplicada como restrição ambiental no planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos.

O capítulo 4 apresenta o problema do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos, e a formulação matemática utilizada para a inserção da restrição ambiental nesse processo.

O capítulo 5 trata dos testes realizados. O capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Matriz Energética

O desenvolvimento econômico e o aumento populacional mundial intensificaram o consumo de energia nas suas mais diversas formas, o que disponibiliza a cada cidadão maiores quantidades de bens e serviços. O aumento progressivo do uso de combustíveis fósseis ocorreu em paralelo ao aumento das atividades industriais, às mudanças no uso do solo e às outras atividades que geram a emissão de gases de efeito estufa¹ e, que são centrais no sistema econômico atual.

O combustível fóssil, principal forma de combustível utilizado, é um bem não renovável, que em função de sua extinção deverá ser substituído por fontes de energia renováveis, propiciando desenvolvimento sustentável. Existe ainda a necessidade de se conciliar desenvolvimento e preservação do meio ambiente de forma a garantir a melhoria da qualidade de vida em todos os aspectos, inclusive ambiental. Uma forma de se garantir isso é avaliar diferentes formas de geração de energia e como seus usos finais determinam os impactos ambientais.

A necessidade mundial da busca de novas fontes renováveis que garantam desenvolvimento sócio-econômico mundial se deve tanto ao fato da comprovada extinção do petróleo em médio prazo, como também das emissões de gases de efeito estufa. Esses gases são principalmente o CO₂ e, em segundo plano, o CH₄² devido à utilização do petróleo como fonte primária de energia. Há necessidade ecológica da busca de opções energéticas renováveis que apresentem impactos ambientais menos danosos.

O processo de intensificação do efeito estufa teve início no período da Revolução Industrial, durante a qual foram desenvolvidos combustíveis fundamentados em aproveitamento de depósitos de hidrocarbonetos (carvão mineral, gás natural e petróleo). Com isso, o homem vem progressivamente interferindo no sistema climático do planeta, que passa

¹ Principais gases de efeito estufa: vapor d'água (H₂O), Ozônio (O₃), Dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), Clorofluorcarbonos (CFCs), Hidrofluorcarbonos (HFCs) e Perfluorcarbonos PFCs).

² O CO₂ (dióxido de carbono) é resultante de toda e qualquer combustão de matéria que contenha o elemento carbono, incluindo os combustíveis fósseis, por exemplo, petróleo, carvão e gás natural. São também emissoras de CO₂ as mudanças no uso do solo causado pelas queimadas florestais, os desmatamentos, visto que a perda da cobertura vegetal libera uma parte do carbono estocado tanto no solo como na vegetação morta. O CH₄ (metano) é o segundo gás que chama maior atenção, produzido pela decomposição de matéria orgânica advindas e atividades como: plantio alagado de culturas, mudanças no uso do solo (desmatamento) e de produção de lixo e esgoto. Há ainda emissões de metano durante a prospecção de petróleo, gás natural e carvão mineral e também durante o seu armazenamento, transporte e distribuição (HAY, 2003).

por um processo de aquecimento global, trazendo consequências irreversíveis e possivelmente catastróficas para as sociedades humanas e para os ecossistemas e sua biodiversidade.

A convenção da ONU (1994), sobre a mudança do clima, objetivou estabilizar as emissões e as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera a nível que impeça as interferências antrópicas de causar danos ao sistema climático, porém assegurando a produção de alimentos e o crescimento econômico de maneira sustentável. O Protocolo de Kyoto estabeleceu metas para emissões dos gases de efeito estufa para o período compreendido entre 2008 e 2012. O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo financia projetos que possam gerar reduções certificadas de emissão e o comércio das mesmas.

A taxa média de crescimento do consumo mundial de petróleo desde 1985 é de 3% e as reservas de petróleo comercialmente exploráveis crescem a taxas menores, o que representa um déficit na relação reserva x consumo. O esgotamento das reservas petrolíferas é incontestável e essa preocupação levou a pesquisa de novas fontes energéticas. Em todo o mundo, a expectativa é que as reservas de petróleo mundiais se esgotem em cerca de 50 anos, a perspectiva é que o preço do barril ultrapasse os US\$100 em oito anos³. Com o fim da era petróleo, a energia renovável será a solução. É essencial a busca de novas alternativas energéticas para o desenvolvimento sócio-econômico mundial e o desenvolvimento de tecnologia para utilização dessas fontes, de forma limpa e eficiente, por profissionais das mais diversas áreas de atuação.

A substituição do óleo diesel e do óleo combustível por fontes renováveis como biomassa vegetal, eólica e solar, ou mesmo, por fontes fósseis menos intensivas em carbono, como o gás natural, apresentam elevado potencial para o desenvolvimento sustentável. Há ainda que se destacar a co-geração, com a utilização do bagaço de cana-de-açúcar de usinas de álcool e açúcar, o uso do álcool e biodiesel como combustíveis líquidos, o aproveitamento energético do lixo por combustão ou reciclagem, a hidroeletricidade e, por último, um fator de extrema importância que é o uso racional de energia através do aumento da eficiência energética. Dentre as fontes renováveis as quais tiveram significativa inserção na matriz energética brasileira estão a eólica, a solar e o biodiesel.

2.1- CENÁRIO MUNDIAL DE RESERVAS PETROLÍFERAS

A produção de energia mundial de petróleo cresceu de aproximadamente 63 milhões de bpd em 1988 até cerca de 80 milhões bpd em 2004. O consumo e a produção de petróleo cresceram cerca de 26% no período de 1988 a 2004, enquanto que a relação reserva-produção

³ O petróleo bruto atingiu, na primeira sexta-feira de Novembro de 2007, o valor de US\$ 94,74, durante o pregão, por barril em Nova York. O petróleo para Dezembro de 2007, fechou com alta de US\$ 4,15, ou 4,6% cotado a US\$94,53 por barril, na Bolsa Mercantil de Nova York. No ano, a alta é de 61%. Contrato negociado para o mês de janeiro no mercado americano fechou a US\$ 98,18 (VALOR ECONÔMICO 2007).

teve apenas ligeiro declínio, situando-se no patamar de 41 anos (análise para ano de 2006) (PIRES, 2006).

Segundo Pires (2006), as reservas mundiais de petróleo totalizavam 1.147,80 bilhões de barris em 2003, e o consumo anual de combustível fóssil estava estimado em 80 milhões de barris/dia. A partir destes dados, a expectativa para extinção deste combustível se daria por volta de 2046. Esta análise não contabiliza a tendência de crescimento de consumo e nem a possibilidade de novas descobertas de reservas⁴.

Um resumo das condições de produção e consumo de alguns países no mundo, e a relação de reserva-produção nos permitem uma visão do cenário das reservas mundiais, segundo dados de Pires (2006). A América do Norte apresentou declínio de produção de cerca de 3% e sua relação reserva-produção apresentou declínio de 36,8% em função do aumento de consumo de 21,1%, reflexo do crescimento econômico. A América do Sul e a América Central apresentaram crescimento da produção da ordem de 67%, cuja maior contribuição se deve à Venezuela e ao Brasil, a relação reserva-produção é a mesma da total mundial, da ordem de 41 anos.

A Europa e Ásia Central tiveram aumento de produção e aumento significativo das reservas frente à incorporação das reservas da Rússia e dos países da Ásia central, o que levou ao acréscimo de 83,3% da relação reserva-produção, que passou de 12 para 22 anos. Devido à maior inserção do gás natural na matriz energética houve redução no consumo da ordem de 13%.

O Oriente Médio apresentou aumento de 61,8% na produção, porém a relação reserva-produção caiu cerca de 30% de 117 para 82 anos. A África aumentou em 60% a sua produção e a relação reserva-produção aumentou para a faixa de 33 anos. A Ásia do Pacífico dobrou o consumo de petróleo entre 1988 e 2004, reflexo da expansão econômica dos países da região, principalmente da China. A produção aumentou cerca de 25% e a relação reserva-produção caiu de 17 para 14 anos.

A tendência de declínio da produção mundial de petróleo é alvo de muitos estudos. Em um cenário mais pessimista, a recuperação final de petróleo seria de 1,8 trilhão de barris e o pico da produção teria ocorrido em 2005. Um cenário mais otimista, 2,6 trilhões de barris de petróleo seriam produzidos e, a produção máxima ocorreria entre 2015 e 2020. Um cenário

⁴ Em Novembro de 2007, foi descoberta uma significativa reserva de petróleo e gás no campo de Tupi, na Bacia de Campos. A reserva está localizada abaixo da camada de sal. A maior dificuldade de exploração é a inexistência de aprendizado do que é trabalhar a essa profundidade. Segundo o Jornal Valor econômico, estima-se que o investimento para explorar a área alcance o patamar dos US\$50 bilhões (VALOR ECONÔMICO, 2007).

intermediário seria da produção de 2,2 trilhões de barris cujo pico ocorreria entre 2010 e 2015 (PIRES, 2006).

De forma geral a demanda global de petróleo cresce a um ritmo bem superior à capacidade de produção mundial, devendo atingir em 2020 aproximadamente 42 bilhões de barris (115 milhões de bpd) (PIRES, 2006).

Antes do esgotamento destas reservas, o petróleo se tornará economicamente inviável em função da elevação do preço para extração, o que incentiva a busca por fontes alternativas de energia para substituição de combustíveis fósseis em curtíssimo prazo.

2.2- FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA

Apesar dos investimentos em unidades de geração hidráulica de energia (hidrelétricas), existe predominância de investimentos no setor de geração de energia baseado no combustível fóssil. Essa predominância é preocupante frente à extinção, em médio prazo, desta forma de combustível e, em curto prazo, frente à elevação de preço de mercado do mesmo em função da sua escassez. Do potencial hidrelétrico brasileiro apenas 25% é aproveitado, mas pode ser expandido, porém sofre limitações ecológicas, restrições econômicas frente aos altos investimentos necessários na transmissão e o longo prazo para execução dos empreendimentos.

O Brasil possui investimentos nos seguintes tipos de combustível de classe fóssil: óleo diesel, óleo combustível, óleo ultraviscoso, gás de refinaria, gás natural e carvão mineral e, de classe biomassa: carvão vegetal, resíduo de madeira, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, licor negro e biogás. Dentre os combustíveis de classe biomassa, há predominância do bagaço de cana-de-açúcar.

O Brasil possui enorme potencial para assumir a dianteira na geração de energias renováveis extraídas de produtos agropecuários. O potencial do agronegócio brasileiro no setor energético inclui a produção de combustíveis como o biodiesel, a célula de hidrogênio, a geração alternativa de energia elétrica e, transações de grande monta no mercado de crédito de carbono (ANUÁRIO EXAME, 2006/2007).

As fontes alternativas se tornarão cada vez mais competitivas em função dos investimentos em tecnologias, ganho de escala e crescente aceitação pelos mercados consumidores. As principais e mais exploradas fontes alternativas de energia são: eólica, solar, biomassa e biodiesel.

2.2.1- BIOMASSA

Inúmeras pesquisas apontam a utilização de biomassa para fins energéticos, principalmente como combustíveis. Por definição, são todos os organismos biológicos que podem ser aproveitados como fontes de energia: cana-de-açúcar, eucalipto, beterraba (álcool), milho (álcool), biogás (produzido pela biodegradação anaeróbica existente no lixo), lenha, carvão vegetal e alguns óleos naturais (amendoim, soja, dendê, mamona), entre outros.

A biomassa para fins energéticos tem uma participação crescente na matriz energética mundial, a qual se estima que até 2050 deva dobrar o uso mundial de biomassa. Uma alternativa crescente é a utilização de combustíveis obtidos na agricultura (etanol, biodiesel, etc).

A- BIODIESEL

As primeiras experiências com biodiesel surgiram na Europa durante a segunda guerra mundial (patente Belga de 1937). A utilização de biodiesel na Europa começou em 1991, como consequência de uma política agrícola comunitária. A Alemanha é considerada a maior produtora de biodiesel e consumidora do mesmo como combustível, tanto no segmento de carros de passeio, quanto em máquinas agrícolas e veículos de carga.

Nos Estados Unidos a utilização do biodiesel iniciou-se com a motivação americana de melhoria da qualidade do meio ambiente. Em 2002, foi criado o Programa Biodiesel com meta de produção de 20 bilhões de litros por ano. Em alguns estados houve incentivo na transformação do excedente de óleo de soja em biodiesel. Instituições de renome técnico-científicas reconheceram oficialmente a excelência do combustível.

Na Argentina em 2001, o congresso aprovou uma lei que isentava imposto por 10 anos em toda cadeia produtiva do biodiesel. Com isso, houve implantação de várias fábricas de biodiesel, o que refletiu o interesse dos usuários pelo combustível alternativo.

No Brasil⁵, os estudos sobre combustíveis alternativos tiveram início na década de 70, com a experiência do ProÁlcool. A Universidade do Ceará foi pioneira na idéia de utilização do biodiesel nos últimos anos da década de 70, sendo que a primeira patente de biodiesel no país foi depositada, em 1980, pelo Dr. Expedito Parente. O biodiesel inseriu-se na matriz energética brasileira a partir do seu marco regulatório determinado pela lei 11.097/2005. Em Março de 2005 foram inaugurados a primeira usina e posto revendedor de biodiesel no Brasil, em Belo Horizonte-MG.

Uma das grandes vantagens do Brasil em relação aos outros países que já produzem biodiesel⁶ é a rica biodiversidade, pois poder-se-ia produzir biodiesel a partir de ampla gama de oleaginosas com elevados teores de óleo (por exemplo: soja, milho, girassol, mamona, palma e dendê). O Anuário Exame (2006-2007) cita relatórios da Ferrostall, uma das líderes de produção de biodiesel na Alemanha, no qual relata que o estado do Pará, sozinho, pode responder por 65% da produção mundial de biodiesel em 2010, se conseguir organizar a produção de dendê.

⁵ Leis decretos e portarias referentes ao biodiesel no Brasil

- A- 08/2003 – Portaria ANP 240 estabelece a regulamentação para a utilização de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos não especificados no país.
- B- 12/2003 – Decreto do governo federal institui a Comissão Executiva Interministerial (CEI) e o grupo Gestor (GG), encarregados da implantação das ações para produção e uso de biodiesel.
- C- 24/11/2004- publicadas as resoluções 41 e 42 da ANP, que instituem a obrigatoriedade de autorização deste órgão para produção de biodiesel, e que estabelece a especificação para a comercialização de biodiesel que poderá ser adicionado ao óleo diesel, na proporção 2% em volume.
- D- 06/12/2004 – Lançamento do programa de produção e uso do biodiesel pelo governo federal.
- E- 13/01/2005 – publicação no DOU da lei 11.097 que autoriza a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira.
- F- Lei 11.097/2005 – Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, estabelece em 5%, em volume, o percentual mínimo obrigatório de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado ao consumidor final, num prazo de 8 anos (2013), sendo 2% em três anos (2008).

⁶ O programa de incentivo à produção de biodiesel beneficia empresas que comprem matéria prima de pequenos agricultores, deixando de fora grandes fabricantes e produtores que trabalham em larga escala. Alguns vêem isso mais como um programa social do que um programa energético para o biodiesel (ANUÁRIO EXAME, 2006/2007).

A.1- Vantagens da inserção do biodiesel na matriz energética brasileira.

O Brasil possui diversas fontes potenciais de oleaginosas para a produção do biodiesel em função de diversidade do seu ecossistema. Como vantagem ecológica, tem-se a fixação de CO₂ da atmosfera pela fotossíntese durante o período de crescimento da cultura e a redução da emissão de CO₂ liberada durante o processo de combustão nos motores, quando comparado com a queima do diesel mineral. Há então redução na contribuição para o efeito estufa. Quando comparado com os combustíveis fósseis, o biodiesel produz 41% menos emissões de gases de efeito estufa, enquanto que o etanol produz 12% menos emissões (ANUÁRIO EXAME, 2006/2007).

Como vantagem macroeconômica, a inserção de nova cadeia de produção gera oportunidades de emprego e renda para a população rural e incentiva a instalação de unidades de beneficiamento em localidades próximas à produção, o que reduz custos de transportes. A substituição do diesel e do óleo combustível por biomassa vegetal para geração de energia elétrica em comunidades e indústrias isoladas (não-conectadas ao sistema interligado de transmissão de energia elétrica) representa enorme potencial para o desenvolvimento sustentável das regiões nas quais esses sistemas de geração são implantados.

A inserção do biodiesel diversifica a matriz energética, possibilita em função do sequestro de carbono, a inserção do país no mercado de carbono, através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e garante desenvolvimento regional tecnológico e economia na importação do óleo diesel.

Segundo a ANP (Agência Nacional de Petróleo), em 2004 o Brasil importou aproximadamente US\$ 826 milhões em óleo diesel. Para uma mistura de biodiesel de 2% no óleo diesel ter-se-ia uma economia de US\$160 milhões/ano, e para uma mistura de 5% no óleo diesel essa economia seria de US\$400 milhões/ano (ANP, 2005).

A partir de 2008 passa a ser obrigatória a mistura de 2% de biodiesel ao óleo diesel (Lei Federal lei 11.097/2005). Haverá então necessidade fixa de disponibilidade de oleaginosas para obtenção do biodiesel (a princípio uma demanda de 782 milhões de litros de biodiesel ano). A cadeia produtiva deverá garantir o fornecimento de insumos básicos para produção do biodiesel. A maior incerteza quanto ao processo reside na uniformidade da disponibilidade de oleaginosas para atendimento ao mercado interno de produção de biodiesel em detrimento ao mercado externo, no caso do preço externo ser mais interessante (ANP, 2005).

Segundo a ANP (2005), a Petrobrás produz cerca de 94% do total do diesel consumido no Brasil, devendo em curto prazo ser auto-suficiente nesse combustível (consumo de diesel em 2005 de 38,5 milhões de litros). O Brasil importa aproximadamente 5% do diesel consumido no país, quantitativo a ser reduzido com a entrada do biodiesel na matriz energética brasileira (5% obrigatório até 2013, Lei Federal 11.097/2005).

A inserção do biodiesel na matriz energética alterou a participação de outros produtos no produto interno bruto agrícola e, conseqüentemente, da área plantada e safra desses produtos. O principal vetor da transformação da agricultura tradicional em agricultura moderna foi a soja, que trouxe todas as tecnologias da evolução verde ao ocupar crescentemente os solos brasileiros. Houve com isso, redução da área colhida das agriculturas típicas de mercado interno, por exemplo, arroz, milho e feijão⁷.

Nos últimos anos, devido ao fato de não existir bons substitutos em muitas das aplicações do óleo de mamona⁸, como também, pela sua versatilidade industrial, a demanda por este óleo vem se expandindo bastante, tanto no Brasil quanto e em outros países industrializados. No Brasil, com o Programa Nacional de Biodiesel, a produção de óleo de mamona para a fabricação de biodiesel tornou-se um mercado muito promissor porque, além de seu potencial energético e da ampla adaptação, a mamona é considerada boa alternativa para a diversificação de sistemas produtivos em estabelecimentos agrícolas de base familiar.

⁷ Em 1985, soja, arroz e cana de açúcar apresentavam respectivamente participações relativas no produto interno bruto agrícola de 10,9%, 8,5% e 3,4% já em 2004 essa participação foi de 20,3%, 1,3% e 2,7%, o que mostra a ampliação na participação da cultura da soja e redução da participação do arroz (dados Seplan-Sepin 2005). Segundo estimativas da Companhia Nacional de Abastecimento, safra 2006/2007, a produção de cana-de-açúcar deve crescer em 9,2% (devido ao aumento de área plantada em 5,5% e aumento de produtividade média em 3,5%), a de soja crescerá entre 0,2% e 3,0% apesar de uma redução na área plantada entre 5,1% e 7,6% e a de arroz decrescerá entre 0,2% e 2,5% apesar de acréscimo de 0,4% na área plantada, devido ao aumento de área plantada de cana e as cotações do preço das terras para plantio de cana praticamente dobraram em algumas regiões. A safra 2005/2006 de arroz apresentou uma redução de 12,5% na produção nacional, devido a uma retração de 23,7% na área plantada, apesar de um acréscimo na produtividade nacional de 14,7%. Goiás apresentou uma redução de 45,7% na produção de arroz, com uma queda na produtividade de 11% e uma redução em área plantada de 39,0% em relação à safra do ano anterior. A soja superou a produção da safra anterior em 3,8%, devido ao ganho de produtividade de 8,8% apesar da redução em área plantada de 4,6%. Goiás foi responsável por 12,0% da produção nacional de soja, uma redução de 8,4% na produção safra 2005/2006, com uma queda na produtividade de 2,1% e uma redução em área plantada de 6,5% em relação à safra anterior.

⁸ O principal produto da mamona é o óleo extraído das suas sementes. O óleo de mamona, cujo principal componente é o ácido ricinoléico, apresenta moléculas com propriedades bastante flexíveis e estrutura, de certa forma, incomum entre os ácidos graxos existentes nos óleos vegetais. Estas características conferem ao óleo da mamona propriedades especiais, permitindo a sua utilização em mais de 400 processos industriais tais como na produção de anticongelantes de combustível de avião e espaçonaves, revestimento de poltronas e paredes de avião (não queima com facilidade nem libera gases tóxicos), componentes de automóveis, lubrificantes, resinas, tintas, cosméticos e medicamentos. Outras aplicações de grande valor econômico do óleo de mamona são a fabricação do nylon e da matéria plástica onde o seu emprego é considerado indispensável (EMBRAPA, 2006).

Acredita-se que, com os investimentos em tecnologia agrícola que estão sendo feitos por empresas industriais e comercializadoras do óleo de mamona e derivados, o Brasil poderá voltar a crescer e competir no mercado internacional nas próximas décadas. Uma das vantagens do óleo da mamona é o seu custo baixo, outra é o fato de não poluir o ambiente. O Brasil é o terceiro maior exportador de óleo de mamona, participando com cerca de 12% do mercado mundial (EMBRAPA, 2006).

Dentre as oleaginosas, a mamona e girassol ganharam interesse por parte dos agricultores, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CNA), a tabela 2.1 apresenta dados relativos a área plantada e produção da cultura de girassol safras 2004/2005 e 2005/2006.

Tabela 2.1- Cultura Girassol, dados CNA 2006

	Área <i>plantada</i> 2004/2005 kha	Produção 2004/2005 kt	Δ área plantada 2005/2006 %	Δ produção 2005/2006 %
Total oleaginosas	215,1	209,8	-27,9	-5,5
Girassol (Brasil)	50,1	68,1	+49,9	+66,5
Girassol (Goiás)	8,50	11,89	+11,0	+2,5

Fonte: Elaborada a partir de dados CNA 2006

As figuras de 2.1 e 2.2 mostram a relação da área plantada por safra das culturas de girassol, arroz, soja e mamona, para safras de 1976 até 2005 para o Brasil e estado de Goiás, elaborados a partir dos dados da CNA.

Uma das preocupações em relação às fontes primárias do biodiesel (principalmente a soja) é o desmatamento na Amazônia e, em áreas de mata atlântica e cerrado, que vêm sendo realizadas para plantio de oleaginosas. Desta forma, o balanço de carbono seria altamente negativo, passando de uma solução sustentável para altamente danosa quanto ao sequestro de carbono (ANUÁRIO EXAME 2006/2007).

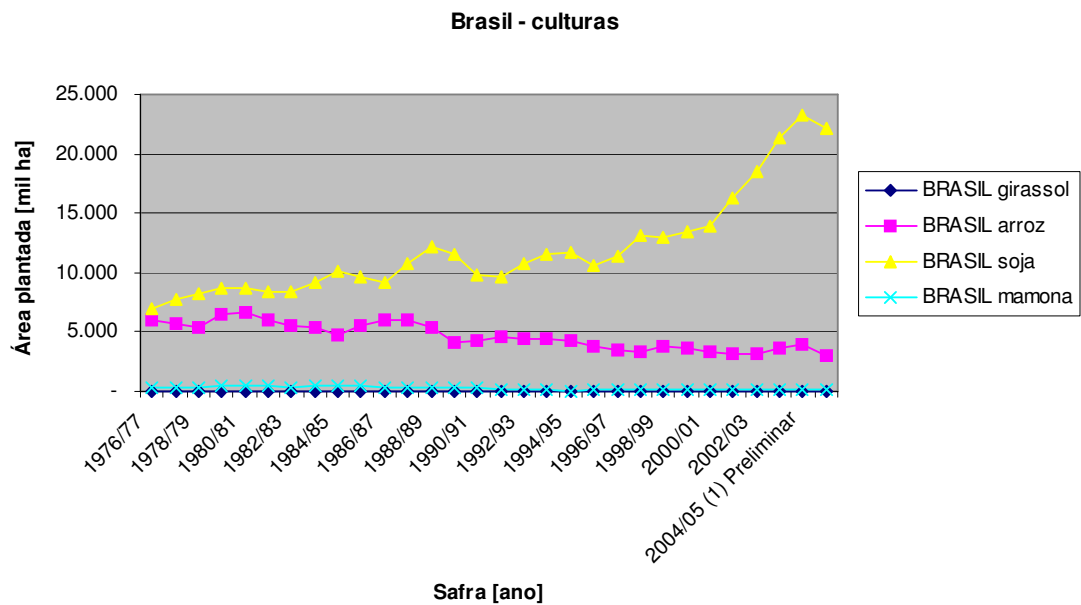


Figura 2.1- Relação área plantada por safra para o Brasil entre 1976 e 2005.

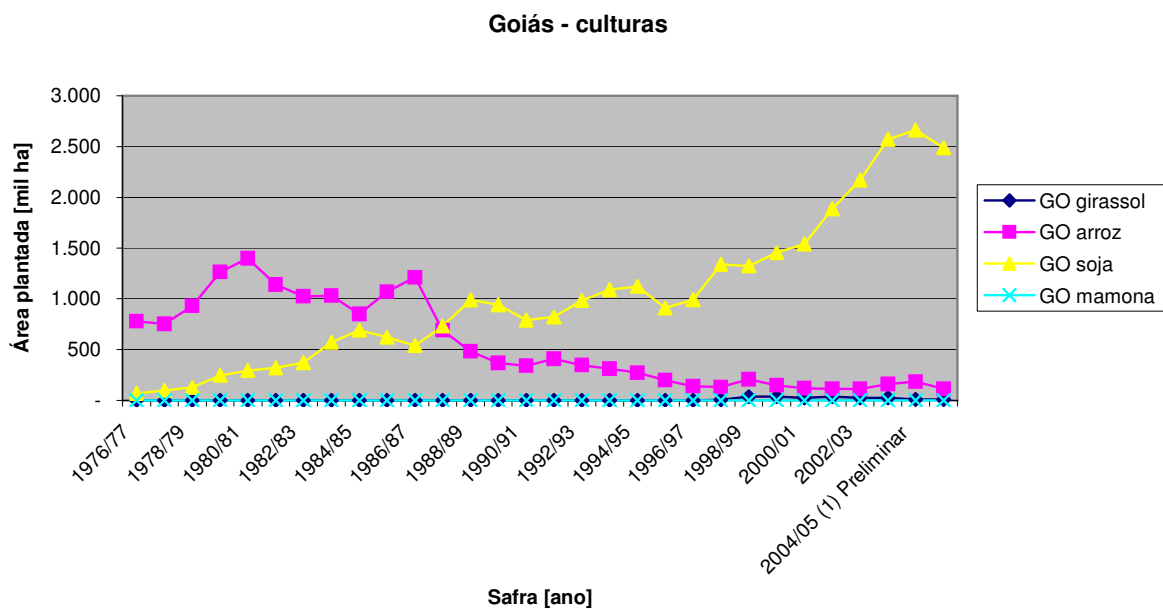


Figura 2.2 - Relação área plantada por safra para o estado de Goiás entre 1976 e 2005.

B- ETANOL

O etanol possui aplicação como combustível (álcool hidratado) e como aditivo na gasolina (álcool anidro). A quantidade de energia por volume torna o álcool um substituto natural para os combustíveis derivados de petróleo, em especial a gasolina. A energia renovável contida no etanol é 8,3 vezes maior que a energia fóssil utilizada para obtê-la, como consequência há corte nas emissões de gases de efeito estufa (ANEEL, 2006).

O etanol pode ser produzido a partir de diferentes matérias-primas, tais como amiláceas (mandioca, batata-doce, milho e outros grãos), celulósicas (madeiras e resíduos agrícolas, dentre os quais destaca-se o bagaço da cana-de-açúcar) e sacarinas (cana-de-açúcar, sorgo sacarino e beterraba). No Brasil praticamente a totalidade do açúcar⁹ e etanol é produzida a partir da cana-de-açúcar¹⁰. Este fato é justificado pela tradição de quatro séculos de plantio e utilização da cana-de-açúcar e da existência de solos adequados. O Brasil possui a maior relação litros de etanol/hectare (índices de produção dados de 1990) sendo 72,5 litros de etanol/tonelada de cana e 91,5 kg de açúcar/tonelada de cana (TOLMASQUIM, 2004).

A cadeia produtiva do açúcar e etanol é praticamente auto-suficiente em termos energéticos com 98% de suas necessidades energéticas atendidas pelo bagaço de cana-de-açúcar. Os 2% restantes supridos por outros insumos energéticos¹¹, os quais são compostos

⁹ Tão importante quanto a produção de cana por hectare é o teor de sacarose obtido, que determina o potencial de produção de açúcar por tonelada de cana, no Brasil esse teor é em média de 12%, sendo que 14% é um índice considerado ótimo (TOLMASQUIM, 2004).

¹⁰ Os principais subprodutos da agroindústria sucroalcooleira são: a biomassa disponível no campo no estágio de colheita da cana-de-açúcar, compostas pelas folhas e os ponteiros da planta crua, que ainda é quase integralmente eliminada através da queima da cultura antes da colheita; o bagaço de cana resultante da moagem da cana-de-açúcar para a extração do caldo; a vinhaça ou vinhoto resultante da destilação do etanol; a torta de filtro proveniente do processo de clarificação do açúcar; a levedura oriunda do processo de fermentação; as cinzas residuais da combustão do bagaço nas caldeiras; e o carvão retirado na lavagem das chaminés. O potencial energético das palhas e pontas com 50% de umidade é de 280kg/tonelada de cana, do bagaço com 50% de umidade é de 270kg/tonelada de cana, do etanol é de 72,5 litros/tonelada de cana (média de produtividade no Brasil) e do vinhoto é de 14 litros/litro de etanol (uso direto na fertirrigação em substituição de fertilizantes tradicionais) (TOLMASQUIM, 2004).

¹¹ Em termos de geração de energia, as usinas anexas geram em média 8,2 kWh/tonelada de cana e as destilarias autônomas em média 10,8 kWh/tonelada de cana. O consumo de energia elétrica em usinas anexas é em média de 12,47 kWh/tonelada de cana e de 10,09 kWh/tonelada de cana em destilarias autônomas. Há então um movimento no sentido de converter destilarias autônomas em usinas anexas. É uma questão de estratégia comercial devido à flexibilidade de produção frente às variações nos mercados de açúcar e etanol. Uma alteração no processo de colheita da cana colocaria uma quantidade de biomassa a disposição proveniente das pontas e palhas, em torno de 42% do bagaço de cana disponível, considerando que somente 60% dessa matéria vegetal possa ser retirada do campo, o que aumentaria ainda mais o potencial energético dessa cultura sem elevação da área plantada, além de eliminar o impacto ambiental das queimadas. A disponibilidade do bagaço de cana é de 270 kg de bagaço/tonelada de cana, com poder calorífico de 9,45 MJ/kg e de biomassa da cana (folhas, pontas e palha) é de 280 kg/tonelada de cana, com poder calorífico de 8,50 MJ/kg, ambos com 50% de umidade (TOLMASQUIM, 2004).

por 41% de óleo diesel, 24% álcool, 22% de lenha, 12,8% de energia elétrica comprada e 0,2% de gasolina (TOLMASQUIM, 2004). Essa auto-suficiência eleva ainda mais os benefícios ambientais desta cultura, convertendo o desperdício em energia elétrica útil (minimiza emissão de carbono, utilização de insumo energético renovável entre outros).

Os esforços para superar os choques do petróleo, fizeram com que os setores agrícola e industrial da cana-de-açúcar experimentassem um grande desenvolvimento tecnológico. Devido ao ganho de eficiência obtido pelo sistema agroindustrial da cana-de-açúcar é possível hoje, produzir álcool a custo inferior ao da gasolina. Como consequência no mercado, veículos leves bi-combustíveis tiveram vendas internas da ordem de 51,9% em 2005 e estima-se que em 2010 chegue aos 80%.

Atualmente, o Brasil utiliza 6 milhões de hectares para o plantio de cana-de-açúcar e produz 15,5 bilhões de litros/ano de etanol. De acordo com o núcleo interdisciplinar de planejamento energético (NIPE) da Unicamp, o Brasil possui disponível cerca de 90 milhões de hectares de área agricultável. As figuras 2.3 e 2.4, fonte ANEEL, apresentam a área atual e a perspectiva de expansão da produção de cana no território nacional.

O Brasil é o maior produtor de etanol (36,4% com 16,7 milhões de m³ na safra em curso), o maior consumidor (14,3 milhões de m³, sendo 13,7 milhões de m³ para fins carburantes) e o maior exportador mundial (50,4%, com 2,4 milhões de m³ em 2004) (TOLMASQUIM, 2004).

A produção de álcool ocorre em mais de 100 países. Foram alcançados 42 bilhões de litros em 2005, concentrados em dois países: o Brasil com 33% do total mundial e os Estados Unidos com 33%. Países como a China, Índia, França, Rússia, Alemanha e África do Sul apresentam percentuais inferiores a 10%. Sua utilização no Brasil, se dá por meio de mistura à gasolina na ordem de 25%, ou no uso direto como substituto direto da gasolina. Países como Canadá, Inglaterra e Austrália possuem incentivos no preço para sua adição à gasolina, porém sem metas a serem alcançadas. A Tailândia impõe uma mistura de 10% na gasolina consumida em Bangkok. A Índia e a Argentina e a união Européia estabelecem metas de mistura à gasolina que variam de 2% e 5% nos próximos cinco anos (PIRES et al., 2006).

Segundo pesquisa da Fundação Getúlio Vargas, no anuário exame 2006-2007, as companhias do setor de álcool registraram crescimento de 23% no faturamento em relação ao do ano anterior, enquanto que em outras empresas de agronegócio houve queda de 2,2% no

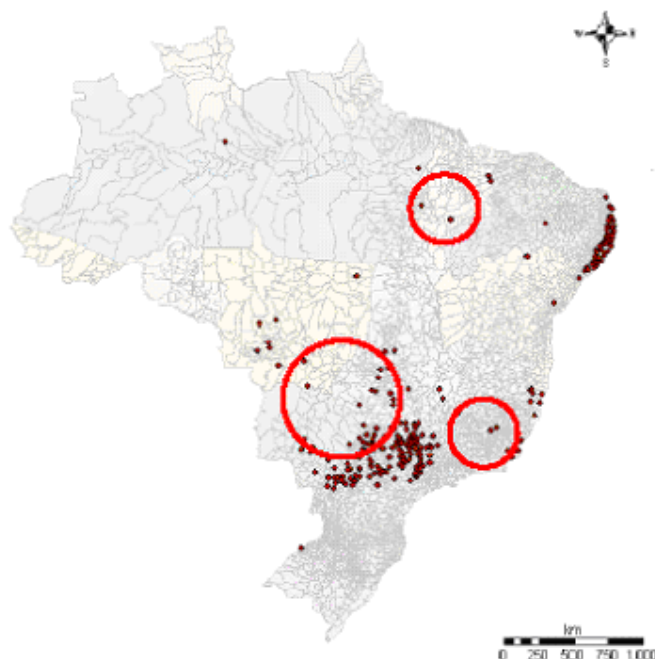
faturamento real de 2005. O Brasil é referência mundial¹² na produção de etanol. É promissor não só na área de exportação de combustível (é o primeiro entre os maiores exportadores e, responsável por 13% do total das exportações mundiais) como também na tecnologia de produção (máquinas e equipamentos para as usinas). Porém, ainda pode apresentar melhorias de produtividade, assim como a sua logística de distribuição.



Fonte: ANEEL 2006

Figura 2.3 – Localização no Brasil das áreas atuais de produção de cana-de-açúcar.

¹² Dentre as empresas brasileiras, a Cosan é o maior produtor individual de açúcar e álcool do mundo, possui 17 unidades produtoras, incluindo a Usina de Barra, a maior do mundo. A empresa exporta 80% de sua produção de açúcar e 15% do álcool (ANUÁRIO EXAME, 2006/2007).



Fonte: ANEEL 2006

Figura 2.4 - Perspectiva de expansão de produção de cana-de-açúcar (áreas circuladas).

2.2.2- SOLAR

As tecnologias de conversão da energia solar compreendem a fotovoltaica, correspondente à conversão direta de energia luminosa em eletricidade por meio de células fotovoltaicas e, a heliotérmica cujo processo é o aquecimento de fluídos de trabalho e/ou geração de eletricidade através de máquinas térmicas.

Células solares convertem luz solar em energia elétrica. Atualmente a potência gerada global por células solares é de 5.000 MW, o que corresponde a apenas 0,15% da capacidade conjunta de todas as fontes energéticas. A produção anual de células fotovoltaicas cresceu mais de 25% ao ano, ao longo da última década e, 45% apenas em 2005. As células produzidas no ano passado acrescentaram 1.727 MW à capacidade geradora mundial, sendo que 833 MW fabricada no Japão, Alemanha com 353 MW e Estados Unidos com 153MW (SCIENTIFIC AMERICAN, 2006).

O potencial brasileiro é de 4 a 6 kWh/m².dia para sistemas fotovoltaicos (ANEEL, 2006).

2.2.3- EÓLICA

A capacidade de geração mundial de turbinas eólicas tem crescido em média 25% ao longo dos últimos dez anos, atingindo aproximadamente 60.000 MW em 2005. Na Europa a capacidade instalada passou de 1.700 MW para 40.000 MW, de 1994 a 2005, sendo a Alemanha responsável por 18.000 MW de capacidade instalada. A Espanha possui 10.000 MW, a Dinamarca 3.000 MW e a Grã-Bretanha, Holanda e Portugal cada um com 1.000 MW. Nos Estados Unidos a capacidade de geração cresceu 36% em 2005, atingindo 9.100 MW, o que corresponde apenas a 0,5% da eletricidade do país (SCIENTIFIC AMERICAN, 2006).

Turbinas cada vez maiores e mais eficientes vêm sendo fabricadas, capazes de gerar de 4 a 6 MW. Porém, existe certa resistência à utilização da energia eólica em função de questões estéticas, pois as centrais eólicas alteram a paisagem (SCIENTIFIC AMERICAN, 2006).

A energia eólica tem como vantagens menores prazos de construção, maior aceitabilidade ambiental e fator de capacidade relativamente baixo. O potencial eólico brasileiro é de 143,5 GW (272 TW/ano) sendo que o centro-oeste corresponde a 2% da capacidade total, localizada em áreas de fronteira com o Paraguai (ANEEL, 2006).

A capacidade instalada brasileira¹³ é de 20.3 MW, com turbinas eólicas de médio e grande porte conectadas à rede elétrica. Existem dezenas de turbinas eólicas de pequeno porte funcionando em locais isolados da rede convencional para aplicações diversas – bombeamento, carregamento de baterias, telecomunicações e eletrificação rural (ONS, 2006). A energia eólica tem papel garantido na geração distribuída de energia elétrica.

2.3- GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO MUNDO

O consumo de energia elétrica no mundo cresceu em média 2,6% ao ano, entre 1990 e 2003, destacando-se a China que apresentou incremento anual médio de 8,9%, aumentando sua participação de 5,2% em 1990, para 11,3% em 2003, no total do consumo mundial. Pelas projeções, o consumo deverá crescer, em média 2,6% ao ano, passando de 14,3 mil TWh em 2002 para 26,0 mil TWh em 2025.

¹³ O PROINFA, totalizando 3.270 MW, como parte integrante da oferta a partir de 1 de janeiro de 2007, distribuído em PCHs (1.192 MW), PCTs (655 MW) e eólicas (1.423 MW), representando em termos de energia, 1.407 MW a partir de 2007 (ONS 2006).

Segundo Pires (2006), a produção mundial em 2003 foi de 16,7 mil TWh, das quais 6,7 mil TWh foi de geração térmica movida a carvão (40% do total), 3,2 mil TWh produzido pelas usinas térmicas a gás natural (19%), 1,2 mil TWh produzidos por usinas térmicas movidas a derivados de petróleo (7%), 2,7 mil TWh correspondente á geração hidrelétrica (16%) e 2,7 mil TWh correspondente à geração nuclear (16%).

Até 2025, estima-se que o carvão manterá sua posição de hegemonia como fonte de geração de energia elétrica. O carvão apresenta distribuição de reservas globais mais dispersa do que o petróleo e gás natural. Ele possui maior estabilidade de preço e oferta, apesar da utilização crescente de gás natural e de fontes renováveis de energia (por exemplo: hidroeletricidade, solar, geotérmica e eólica).

A crescente preocupação com as emissões de CO₂, transformou a energia nuclear na solução complementar para geração de energia elétrica nas próximas décadas. Nos últimos cinco anos, o aumento de geração nuclear foi de 234 TWh, o que equivale a geração de 33 novas usinas, porém somente 3 usinas entraram em operação neste período. Este fato reflete o aumento do fator de aproveitamento das unidades existentes, avanços tecnológicos no setor nuclear. A instabilidade dos preços de petróleo e a idéia de se agregar o custo do carbono ao preço da energia gerada a partir de fontes fósseis, conferem atratividade ao custo da energia nuclear, atraindo a atenção de investidores devido ao aumento do interesse por essa fonte limpa e competitiva.

2.4- GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

A Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, criou o Banco de Informações de Geração (BIG) para divulgar, "on-line", uma série de dados que a agência reúne sobre o parque gerador brasileiro, no qual estão disponíveis informações sobre as usinas regularizadas em operação, construção e as outorgadas no período de 1998 a 2005, tanto hidrelétricas como pequenas centrais hidrelétricas, termelétricas, nucleares, eólicas e outras fontes alternativas (ANEEL, 2006).

Segundo a ANEEL, dados de 2005, o Brasil possui no total 1.581 empreendimentos em operação, com capacidade instalada de 96.320.429 kW (referentes à potência fiscalizada, que é considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora), com previsão de expansão na capacidade de geração do país nos próximos 5 anos de 26.817.122 kW, dos quais 68 empreendimentos se encontram atualmente em construção e mais 506 outorgadas.

O operador nacional do sistema elétrico, ONS, assume para o planejamento da operação elétrica de médio prazo anual, período 2007-2008, taxa de 4,1% de crescimento de carga consolidada do sistema integrado nacional.

A tabela 2.2 apresenta a quantidade e a potência associada dos empreendimentos de geração de energia em operação, construção e outorga para as diferentes categorias. Atualmente, há investimentos na utilização de fontes de energia eólica, fotovoltaica, hidrelétrica e termoeletrica.

A tabela 2.3 fornece o percentual e a capacidade instalada dos empreendimentos em operação relacionados com a matéria-prima. A tabela 2.4 apresenta os percentuais das classes de combustíveis (excluído o percentual referente à fonte hidráulica) para empreendimentos em operação e construção, elaborada a partir de dados da ANEEL 2006.

Tabela 2.2- Empreendimentos em operação, construção e outorga, ano 2006

Tipo	Operação		Construção		Outorga 1998/2005		Potência fiscalizada
	Quantidade	%	Quantidade	%	Quantidade	%	Operação kW
Termelétrica	946	23,67	16	24,49	94	40,53	22.803.469
Hidrelétrica	156	74,56	7	52,77	29	25,97	71.820.411
PCH ¹⁴	269	1,46	43	21,16	214	14,34	1.405.863
Eólica	14	0,19	1	1,55	109	19,89	186.850
CGH	195	0,11	1	0,03	60	0,17	103.816
Potência Outorgada total kW	96.320.429		3.228.048		23.589.074		96.320.429

Fonte: Elaborada a partir de dados retirados de ANEEL 2006

¹⁴ Classificam-se como pequenas centrais elétricas empreendimentos de 1 MW a 30 MW, desde que a área total do reservatório se limite a no máximo 3 km².

Tabela 2.3- Empreendimentos em operação relacionados à matéria prima.

Tipo		Capacidade Instalada		%	Total		%
		N.º de Usinas	(kW)		N.º de Usinas	(kW)	
Hidro		620	73.330.090	70,18	620	73.330.090	70,18
<u>Gás</u>	Natural	74	9.888.408	9,46	101	10.826.156	10,36
	Processo	27	937.748	0,90			
<u>Petróleo</u>	Óleo Diesel	547	3.635.985	3,48	566	4.885.335	4,68
	Óleo Residual	19	1.249.350	1,20			
<u>Biomassa</u>	Bagaço de Cana	226	2.642.675	2,53	268	3.664.554	3,51
	Licor Negro	13	782.617	0,75			
	Madeira	25	212.832	0,20			
	Biogás	2	20.030	0,02			
	Casca de Arroz	2	6.400	0,01			
<u>Nuclear</u>		2	2.007.000	1,92	2	2.007.000	1,92
<u>Carvão Mineral</u>	Carvão Mineral	7	1.415.000	1,35	7	1.415.000	1,35
<u>Eólica</u>		14	186.850	0,18	14	186.850	0,18
Importação	Paraguai		5.650.000	5,46		8.170.000	7,82
	Argentina		2.250.000	2,17			
	Venezuela		200.000	0,19			
	Uruguai		70.000	0,07			
Total		1.578	104.484.985	100	1.578	104.484.985	100

Fonte: ANEEL 2006.

Tabela 2.4- Percentual de tipo de combustível utilizado em empreendimentos em operação e construção (excluído o referente à hidráulica).

Tipo		%			
		Operação		Construção	
		Corresponde a 23,87%		Corresponde a 27,04%	
Combustíveis fósseis	Óleo Diesel	79,22	22,08	62,13	0,0
	Gás natural		60,04		76,95
	Carvão mineral		8,59		0,0
	Óleo combustível		6,79		23,05
<u>Biomassa</u>	Bagaço de Cana	17,63	72,11	13,01	53,45
	Licor Negro		21,36		0,0
	Madeira		5,59		39,55
	Biogás		0,55		0,0
	Casca de Arroz		0,17		0,0
	Carvão Vegetal		0,22		7,0
Outras Formas ¹⁵		3,16		24,85	

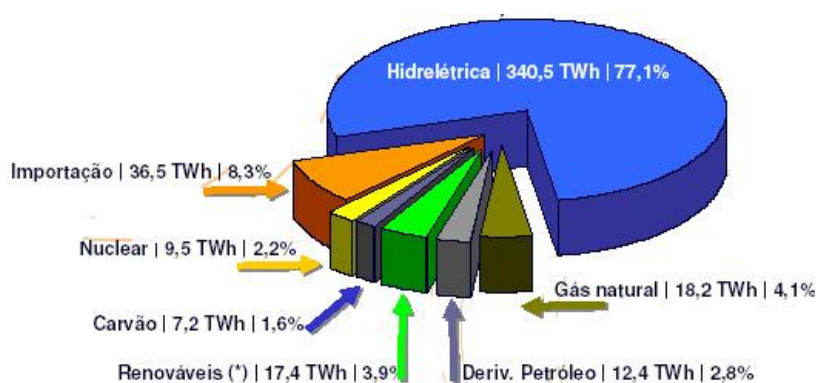
Fonte: Elaborada a partir de dados ANEEL 2006.

¹⁵ Os combustíveis que compõem a classe outros são: gás de alto forno, gás de processo, enxofre, efluente gasoso e gás siderúrgico.

Atualmente, verifica-se maior interesse na utilização da biomassa para geração de energia elétrica devido à elevação das quantidades de resíduos resultantes das culturas agrícolas e a necessidade de seu descarte adequado, preferencialmente com aproveitamento econômico. Outro aspecto, são as pressões sociais por alternativas de geração de energia elétrica que provoquem menores impactos ambientais, em particular no que concerne à emissão de gases de efeito estufa.

A biomassa na geração de energia elétrica apresenta inúmeras vantagens ambientais: aproveitamento do potencial dendro-energético brasileiro; abatimento das emissões de carbono na atmosfera em relação a fontes fósseis; a redução da destruição de florestas; da inundação de terras agricultáveis e da interferência em ecossistemas tropicais em relação às fontes hidráulicas; o aproveitamento de terras de uso marginal para agricultura implantando maciços florestais nestas áreas. Outra importante vantagem é a descentralização da geração de energia elétrica e, associado a isto, tem-se a redução dos custos de transmissão de energia.

A oferta interna de energia elétrica no Brasil está apresentada na figura 2.5.



Fonte: ANEEL 2006

(*) inclui biomassa, eólica e outras renováveis não convencionais; PCH incluída em hidrelétrica.

Figura 2.5 - Oferta de energia interna de eletricidade no Brasil, 2005

2.5- GERAÇÃO DE ENERGIA NO ESTADO DE GOIÁS

O Brasil tem capacidade instalada de 96.320.429,65 kW, dos quais, 8.87% estão instaladas no estado de Goiás (sendo que usinas de divisa são computadas para ambos os estados). O estado de Goiás é o quarto em capacidade instalada por estado, onde destacam os estados de São Paulo (22,19%), Minas Gerais (18,56%) e Paraná (17,40%) (ANEEL, 2006).

O estado de Goiás possui, no total 43, empreendimentos em operação, gerando 8.547.156 kW de potência. Está prevista para os próximos anos adição de 1.490.199 kW na capacidade de geração do estado, proveniente dos seis empreendimentos atualmente em construção e mais 27 com outorga assinada (ANEEL, 2006).

Dos empreendimentos em operação, 96,34% correspondem a usinas hidrelétricas; 3,32% usinas termelétricas; 0,29% de pequenas centrais hidrelétricas e 0,05% de centrais geradoras hidrelétricas. Dentre os empreendimentos em construção, 73,27% se referem a usinas hidrelétricas e 26,73% de pequenas centrais hidrelétricas (ANEEL, 2006).

Dos empreendimentos outorgados entre 1998 e 2004 que não iniciaram a construção, 66,76% se referem a usinas hidrelétricas, 20,88% a pequenas centrais hidrelétricas e 12,20 % de usinas termelétricas (ANEEL, 2006).

A tabela 2.5 apresenta um resumo da situação atual dos empreendimentos de geração de energia no estado de Goiás. Atualmente, há investimentos na utilização de fontes de energia eólica, fotovoltaica, hidrelétrica e termoeletrica. Nas figuras 2.6 a 2.9 estão espacializados as usinas hidrelétricas e termelétricas do estado de Goiás em operação, construção e outorgadas (ANEEL, 2006).

Tabela 2.5- Resumo da situação atual dos empreendimentos de geração de energia em Goiás

Fonte de Energia	Situação	Potência Associada (kW)
25 empreendimento(s) de fonte Hidrelétrica	com sua construção prevista	1.056.804
6 empreendimento(s) de fonte Hidrelétrica	Em construção	286.600
25 empreendimento(s) de fonte Hidrelétrica	Em operação	8.263.359
2 empreendimento(s) de fonte Termelétrica	com sua construção prevista	146.795
18 empreendimento(s) de fonte Termelétrica	Em operação	283.797

Fonte: ANEEL 2006.

2.6- BALANÇO ENERGÉTICO DO ESTADO DE GOIÁS

O estado de Goiás possui área territorial de 340.086,7 km², o que equivale a 3,99% da área do Brasil, com população, em 2004, de 5.508.245 habitantes o que equivale a 3,03% da população brasileira. O PIB do estado foi de R\$42.000 milhões em 2004, equivalente a 2,38% do PIB Brasil, com renda per capita de R\$ 7.625 (Seplan-GO, Balanço Energético do Estado de Goiás – série 1990-2004).

A produção de energia em 2004 foi de $4.233 \cdot 10^3$ tep (toneladas equivalente de petróleo), o que equivale a 2,22% da produção brasileira, para uma oferta interna de energia de $5.152 \cdot 10^3$ tep o que equivale a 2,41% da oferta do país, sendo que o consumo de energia foi de $4.459 \cdot 10^3$ tep em 2004. Goiás, no que tange ao consumo de energia, é um estado cuja auto-suficiência se mantém em torno de 80% (Seplan-GO, Balanço Energético do Estado de Goiás – série 1990-2004).

O consumo per capita de energia em Goiás é de 0,810 tep/hab em 2004, um índice pequeno quando comparado com o do Brasil, 1,053 tep/hab em função da predominância da agropecuária, setor que consome relativamente pouca energia (Seplan-GO-Sepin).

2.6.1- ENERGIA PRIMÁRIA¹⁶ NO ESTADO DE GOIÁS

No período 1994-2004, Goiás aumentou sua produção de energia hidráulica em 57%, e o caldo de cana (principalmente para produção de álcool) em 160,3%. O bagaço de cana sofreu acréscimo de 154%. Houve redução de 32,2% da produção de lenha neste período (produto em evidente escassez). A energia primária no estado experimentou aumento de 47%, enquanto que a população apresentou crescimento de 30% no mesmo período (Seplan-GO-Sepin).

Em 2004, a produção de energia hidráulica foi de $22.716 \cdot 10^3$ MWh, 8,41% superior à produção de 2003, sendo que 65% da energia hidrelétrica produzida em Goiás foi exportado para outros estados, $14.779 \cdot 10^3$ MWh (Seplan-GO, Balanço Energético do Estado de Goiás – série 1990-2004).

2.6.2- CONSUMO DE ENERGIA NO ESTADO DE GOIÁS

O consumo de eletricidade cresceu 54,88%, entre 1994 e 2004, apesar de ter apresentado redução de 8,4%, em 2001, devido ao racionamento, porém com crescimento de 6,9% em 2002, 9,3% em 2003 e 3,5% em 2004. O consumo de álcool, no setor de transportes, manteve-se no patamar de 360 milhões de litros/ano, gerando excedente a partir

¹⁶ Entende-se como fonte primária de energia os produtos energéticos fornecidos diretamente pela natureza, como petróleo, gás natural, carvão mineral, urânio, lenha e outros. Parte da energia produzida pelas fontes primárias não é consumida diretamente na forma primária, praticamente todas as fontes primárias de energia podem ser transformadas em eletricidade.

de 2001 que foi exportado para outros estados (Seplan-GO, Balanço Energético do Estado de Goiás – série 1990-2004).

As tabelas 2.6 e 2.7 apresentam os consumos de energia por setor e por fonte para o estado de Goiás respectivamente.

Houve crescimento de 7,54% do consumo final de energia 2003-2004, em 2004 atingiu $4.459 \cdot 10^3$ tep. A produção de energia apresentou crescimento de 9,27%, para o mesmo período, num total de $4.157 \cdot 10^3$ tep, cuja taxa de crescimento superou a taxa de crescimento do consumo.

Tabela 2.6- Consumo de energia por setor em Goiás

Consumo por setor	2004 [%]	2004 [10^3 tep]	Δ 1994 – 2004 [%]
Transporte	37,8	1.684	+3,4
Industrial	23,3	1.037	+0,8
Agropecuário	8,8	391	-1,1
Residencial	13,3	592	-6,9

Fonte: Elaborada a partir de dados Seplan-GO-Sepin, Balanço Energético do Estado de Goiás série 1990-2004.

Tabela 2.7- Consumo de energia por fonte em Goiás

Consumo por fonte	2004 [%]	[10^3 tep]	Δ 1994 – 2004 [%]
Derivados de petróleo	55,7	2.485	+2,9
Eletricidade	14,0	626	+1,4
Álcool	4,4	197	-1,0

Fonte: Elaborada a partir de dados Seplan-GO-Sepin Balanço Energético do Estado de Goiás série 1990-2004.

2.6.3- AUTO-SUFICIÊNCIA DE ENERGIA DO ESTADO DE GOIÁS

No período 2000-2004 observa-se crescimento de 15,8% na demanda de energia, de 4,7% na importação e de 27,8% na exportação de energia, crescendo a auto-suficiência em 11,3%. No período de 2003-2004, ocorreu acréscimo de 12% na exportação de eletricidade, de 31% na exportação de carvão vegetal e de 3,8% na exportação de álcool etílico. A dependência externa goiana de energia em 2004 foi de 17,7% (Seplan-GO-Sepin).

Enquanto a demanda de energia em Goiás cresceu 42,7% no período 1994-2004, a produção de energia primária cresceu 48,4% e a importação cresceu 47,9%. A exportação no estado subiu 68,1%, de 1994 para 2004, crescimento atribuído principalmente à eletricidade, cuja exportação aumentou em 67%. O álcool destacou-se como fonte energética alternativa

cujo excedente exportado foi de $177 \cdot 10^3$ tep em 2004 (341 milhões de litros) (Seplan-GO, Balanço Energético do Estado de Goiás – série 1990-2004).

2.6.4- MATRIZ ENERGÉTICA DO ESTADO DE GOIÁS

A oferta interna de energia, em 2004, sofreu acréscimo de 7,5% em relação a 2003, as fontes de energia não renováveis participaram com 50,2%, destacando-se o óleo diesel com 25%, a gasolina com 9,9%, o GLP com 6%, o óleo combustível com 6%, “outros não energéticos do petróleo” com 1,8%, o querosene com 0,5% e “outras secundárias de petróleo” com 0,8% (Seplan-GO, Balanço Energético do Estado de Goiás – série 1990-2004).

As fontes renováveis participaram com 49,8% da oferta interna de energia em 2004, destacando-se os derivados de cana-de-açúcar com 27,9%, seguido de 13,2% de energia hidráulica (eletricidade) e 8,6% de lenha e carvão vegetal (Seplan-GO-Sepin).

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de óleos vegetais, a capacidade diária de extração de óleo de soja é suficiente para atender a necessidade diária de biodiesel; aproximadamente de 2 milhões de litros a partir de 2008. O estado de Goiás classifica-se como o quinto estado em capacidade de processamento de oleaginosas no Brasil, com 10.320.000 kg/dia, caracterizando 9% da capacidade do Brasil.

Em Goiás, a produção de etanol na safra 2004/2005 chegou a 717.280 m³. Estima-se crescimento de 11,72% da área a ser colhida, que deve chegar a 211,87 mil hectares em 2005/2006, contra 189,65 mil hectares da safra 2004/05, de acordo com dados do Sindicato da Indústria de fabricação de Álcool do Estado de Goiás. Existem 15 destilarias em operação no estado e, pelo menos 54 estão projetadas para instalação nos próximos anos, segundo a Federação de Indústrias do Estado de Goiás.

Em Goiás¹⁷, o consumo de diesel foi de 1,5 bilhão de litros em 2005, com a adição de 2% de biodiesel, ter-se-ia redução de consumo de diesel de 30 milhões de litros e para 5 % de adição a redução no consumo de diesel seria de 76 milhões de litros.

¹⁷ Leis e Decretos do Estado de Goiás de apoio ao Biodiesel

- A- Decreto 6.085/2005 – Institui o Programa Goiano de Biodiesel para articular-se e interagir com o programa Nacional de Biodiesel e para formar parcerias com o setor privado para o planejamento e a implementação do Programa
- B- Lei 14.435/2005 – Institui o Fundo de Incentivo do Biodiesel no Estado de Goiás – FUNBIODIESEL. Para aplicação na pesquisa e melhoria de processos da qualidade da matéria prima e dos produtos e subprodutos, no treinamento e na capacitação técnica profissional, sendo administrado por um Conselho Gestor.

Em 1990, a auto-suficiência do estado em energia total era de 82,8%, sendo que em 2004 essa auto-suficiência passou a ser de 82,20%. Neste período, houve um acréscimo de demanda de energia de $3.050 \cdot 10^3$ tep em 1990, para $5.152 \cdot 10^3$ tep em 2004. Mesmo com o crescimento de demanda de energia nesse período, a produção do estado foi tal que manteve o patamar de auto-suficiência (dependência externa de 17,8%) (Seplan-GO-Sepin).

2.6.5- POTENCIAL HIDRELÉTRICO, TERMELÉTRICO E SOLAR DO ESTADO DE GOIÁS

Considerando a capacidade integral das usinas hidrelétricas fronteiriças, Goiás possui um parque gerador em operação de 8.543,83 MW, sendo 8.231,46 MW de origem hidráulica (dos quais 8.188 MW de usina hidrelétricas, 38,35 MW de pequenas centrais elétricas e 5,11 MW de centrais geradoras hidrelétricas, valores de potência fiscalizada, que é aquela obtida a partir da operação comercial da primeira unidade geradora) e 312,37 MW de origem térmica. A capacidade total de energia solar do estado é de 104 kW, localizada principalmente nas regiões norte e nordeste do estado (ANEEL, 2006).

Goiás possui 437 MW de potencial hidrelétrico em construção e outorgado o estado possui 1258,3 MW de potencial hidrelétrico e 79,2 MW de potencial termelétrico (ANEEL, 2006).

O parque gerador existente no Brasil era de 92.490 MW em Novembro de 2005 (ANEEL, 2005), sendo que 9% desta capacidade, encontrava-se no estado de Goiás. Em 2006 o parque gerador era de 96.320 MW dos quais 8,87% estavam em Goiás. Em 2004, Goiás produziu $22.996 \cdot 10^3$ MWh e exportou $14.779 \cdot 10^3$ MWh, o correspondente a 64,3% da energia produzida.

2.6.6- DADOS DO DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DE GOIÁS

Analisando o consumo de energia por classe, no período de 1990 a 2004, observa-se que o residencial cresceu de 1.164.458 MWh para 2.359.398 MWh. (de 697.053 consumidores para 1.574.178 consumidores) enquanto que o industrial passou de 1414.700

C- Lei 15.571/2006 – Autoriza a concessão de crédito outorgado do ICMS para o biodiesel B100, que pode ser utilizado para abater o valor a pagar de ICMS, liquidar débitos inscritos em dívida ativa ou ser transferido para outro contribuinte em Goiás, até o limite de 1,5 milhão de reais.

para 2.244.394 MWh (de 6.063 consumidores para 15.213 consumidores) e o rural de 183.928 MWh para 828.632 MWh (de 36.610 consumidores para 130.527 consumidores).

A energia gerada de 1998 para 2003, sofreu acréscimo na hidráulica de $16.375 \cdot 10^3$ MWh para 20.954 MWh e térmica de 0 (zero) para $231 \cdot 10^3$ MWh. Em 2004, a geração total de energia foi de $21.185 \cdot 10^3$ MWh sendo que 13.191 10^3 MWh foram exportados, dado que o consumo foi de $7.036 \cdot 10^3$ MWh e perdas no sistema de $958 \cdot 10^3$ MWh (dados Seplan). Nesta análise foram consideradas as seguintes usinas no estado de Goiás: Serra da Mesa (Furnas), Cana Brava (Tractbel), Rochedo (Celg), São Domingos (Celg), Manbaí (Celg) e Mosquito (Celg) e, considerou-se 50% da energia produzida nas usinas localizadas em rios fronteiriços: Emborcação (Cemig), Itumbiara (Furnas), Cachoeira Dourada (CDSA) e São Simão (Cemig).

A taxa real de variação do PIB de 1998 a 2002 foi de 2,19% para 4,90%, e em 2003 foi de 5,06%, sendo agropecuária de 6,97% para 7,82% e indústria de -0,97% para 3,26%, no período 1998 à 2002. O PIB per capita passou de R\$3.610,00 para R\$5.922,00, no período de 1998 a 2002, e em 2003 foi de R\$6.825,00 (Seplan-GO, Balanço Energético do Estado de Goiás – série 1990-2004).

A agropecuária em 1998 foi responsável por 16,35% do PIB e a indústria por 28,74%. Em 2004, houve crescimento em ambos os setores, sendo que a agropecuária se referiu a 22,51% do PIB do estado e a indústria a 32,62% do PIB do estado.

A participação do estado de Goiás no PIB do Brasil em 1998 foi de 1,91% com consumo de energia elétrica total de 5.893.936 MWh, em 2002 de 2,33% do PIB Brasil e consumo total de energia elétrica de 6.435.778 MWh e, em 2003, essa participação foi de 2,37% e consumo de energia elétrica de 7.104.735 MWh.

2.7- COMPARAÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA QUANTO À EMISSÃO DE CARBONO

O dióxido de carbono (CO_2) e os nitróxidos (NO_x) geralmente originam-se através da queima de combustíveis fósseis, enquanto o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O) são subprodutos ou produtos finais do processo de decomposição microbiana da matéria orgânica¹⁸. A queima de combustível fóssil adiciona alguns bilhões de toneladas por ano de CO_2 para atmosfera. Uma quantidade aproximadamente igual é gerada pela destruição de vegetação e solo.

¹⁸ O tempo de vida do CH_4 na atmosfera é de aproximadamente de 10,5 anos, enquanto que o do CO_2 atinge 120 anos. O CH_4 , em parte, transforma-se em CO_2 na atmosfera reagindo com radicais de hidroxila.

A tabela 2.8 apresenta uma lista de países com suas respectivas emissões de CO₂ na atmosfera.

Tabela 2.8 - Emissão de CO₂ a partir da queima de combustíveis fósseis durante o ano 2004

País	Emissão de CO ₂ Milhões de toneladas	% da Emissão Mundial Total - %
Brasil	337	1,2
Canadá	588	2,2
China	4.707	17,4
EUA	5.912	21,9
França	406	1,5
Índia	1.113	4,1
Japão	1.262	4,7
Rússia	1.685	6,2
Espanha	362	0,3
Mundo	27.044	100,0

A contribuição do uso de energia no Brasil para o aumento do efeito estufa é significativamente inferior. Considerando apenas as emissões de CO₂ em 1990, foram de 73 Mt C/ano, o que corresponde a 1% das emissões globais contra 4,7 a 6,6% do desmatamento da Amazônia (ROSA, 2002). O baixo valor das emissões de CO₂ por causa do uso de energia se explica pela grande participação da hidroeletricidade e de biomassa renovável na matriz energética brasileira. Porém, além da contaminação conhecida de mercúrio em peixes, causada pelas atividades das hidrelétricas, os reservatórios de hidrelétricas podem aumentar o fluxo de CH₄ e CO₂ para a atmosfera¹⁹. Alguns autores afirmam que, em alguns casos, este aumento, por unidade de energia produzida, pode ser significativo se comparado aos gases de efeito estufa, emitido pela geração de eletricidade, por combustível fóssil, porém não é uma opinião unânime entre os pesquisadores da área (ROSA, 2002).

¹⁹ O fundo dos reservatórios contém biomassa inundada que se decompõem, emitindo principalmente CO₂, CH₄ e N₂ resultante da decomposição anaeróbica. Na decomposição aeróbica apenas CO₂ é emitido. Parte do carbono originalmente presente é emitido como gás, e outra parte é levada pela água como ácidos húmicos e fúlvicos. Nem todo o metano gerado no sedimento separa-se em bolhas. Na água superficial, parte do metano difunde-se através da superfície, a profundidades além de 30 metros. Todo o CH₄ pode difundir-se ajudado pela pressão prevaiente e não mais bolhas são formadas. A camada oxigenada do reservatório é um sumidouro para metano; em uma maneira similar as formas fotossintéticas são um sumidouro para o dióxido de carbono (ROSA, 2002).

A taxa de emissão de gases de efeito estufa, por unidade de eletricidade produzida, variará de acordo com as características do reservatório, a extensão e o tipo da paisagem inundada e o modo de geração de energia. Como a degradação determina a maioria do CO₂ e CH₄ produzido, estimativas confiáveis da produção de gases de efeito estufa durante o ciclo de vida de um reservatório hidrelétrico não serão atingidas, até que se melhor identifique as fontes de matéria orgânica e as taxas dos processos microbianos envolvidos em sua decomposição (ROSA, 2002).

Emissões de metano, das áreas de várzea do Rio Amazonas, emitidas para a atmosfera, foram determinadas em pesquisa datada de 1988. A várzea é uma região de alta produção primária e temperaturas uniformemente quentes, que constituem potencial para produção de CH₄ (ROSA, 2002). Os resultados obtidos nessa pesquisa mostraram que a taxa média total de emissão do CH₄ através de várzeas foi de 390 mg CH₄ m⁻² d⁻¹. Superfícies cobertas por macrófitas aquáticas tiveram as maiores emissões, 590 mg CH₄ m⁻² d⁻¹, enquanto as emissões de florestas inundadas foram 110 mg CH₄ m⁻² d⁻¹ e áreas de lago aberto mediram 120 mg CH₄ m⁻² d⁻¹ (ROSA, 2002). A partir de levantamentos da emissão de CH₄ e de CO₂, pelas hidrelétricas na Amazônia, concluiu-se que a contribuição das hidrelétricas é na maioria dos casos muito inferior que o CO₂ de termoeletricas equivalentes.

Além do tipo de área alagada, outro aspecto a ser analisado é a densidade de biomassa na floresta, bem como a sua decomposição anaeróbica sob a água.

Teoricamente a maior parte de emissões de CH₄ e CO₂ pelo reservatório da hidrelétrica é concentrada no tempo, logo após o fechamento da barragem, decaindo ao longo de um período de poucos anos. As emissões de CO₂ pelas termelétricas se mantêm contínuas ao longo de toda vida útil da planta²⁰.

Segundo Rosa (2002), em geral a quantidade de metano emitido, por causa das represas é muito inferior ao do dióxido de carbono equivalente que seria emitido por termelétricas, levando em conta três opções tecnológicas: carvão-convencional, óleo-convencional e gás natural-ciclo combinado. Reservatórios que apresentam áreas mais profundas emitem menos metano do que as áreas superficiais, e reservatórios mais jovens emitem mais metano que os reservatórios mais velhos. Entretanto, em casos específicos em que a densidade de potência da

²⁰ A composição dos gases de efeito estufa para hidrelétricas seria CH₄ emitido pela decomposição da matéria orgânica submersa pela água com taxa de decaimento em torno de 10,5 anos, CO₂ emitido pela decomposição de matéria orgânica, CO₂ produzido na atmosfera pela oxidação do CH₄ emitido (efeito indireto). Para usinas termelétricas seria CO₂ emitido pela combustão do combustível fóssil a uma taxa constante durante toda sua vida útil, CH₄ emitido na produção, transporte e transformação do ciclo do combustível e CO₂ produzido na atmosfera pela oxidação do CH₄ emitido (efeito indireto) (ROSA, 2002).

hidrelétrica é extremamente baixa (W/m^2), como em Balbina²¹, no Amazonas, não é evitada a emissão de carbono. A hidroeletricidade é ambientalmente menos danosa que a termelétrica, a base de combustíveis fósseis, quanto às emissões de gases de efeito estufa (ROSA, 2002).

A implementação de captura e armazenamento de CO_2 , ou sequestro do carbono geológico (CAC), em usinas termelétricas a carvão é imperativa para evitar que maior parte do dióxido de carbono produzido atinja a atmosfera. Segundo a Scientific American (2006), estudos e projeto indicam que as tecnologias existentes de geração de energia poderiam capturar de 85% a 95% do carbono no carvão como CO_2 .

O impacto do etanol sobre a emissão de gases de efeito estufa é ambíguo. Estima-se que a substituição da gasolina por etanol reduza em 18% as emissões de gases de efeito estufa, porém há incertezas no que se refere às práticas agrícolas – no que tange ao impacto ambiental do uso de fertilizantes e maquinário agrícola. As estimativas variam de uma diminuição de 36%, até o aumento de 29% nas emissões de carbono. Porém, substituição da gasolina por etanol de celulose pode reduzir as emissões em mais de 90%, visto que as emissões são equilibradas pela absorção de dióxido de carbono que ocorre durante o crescimento das próprias plantas utilizadas na produção do etanol (SCIENTIFIC AMERICAN, 2006).

Segundo a ANEEL, as emissões de gases de efeito estufa alcançarão em torno de 38 MtCO_2 em 2014, o que equivale a um aumento de cerca três vezes em relação ao valor das emissões estimadas para 2006 de 12,2 MtCO_2 . Esta estimativa se refere à expansão termelétrica prevista no plano decenal 2006-2015.

2.8- COMPARAÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA QUANTO AO CUSTO DO MWh GERADO

A eletricidade produzida por células fotovoltaicas (células cristalinas com eficiência de 30% ou mais) tem custo que varia entre US\$ 200 e US\$ 250 por MWh, em comparação com US\$ 40 a US\$ 60 no caso da eletricidade produzida a partir do carvão, US\$50 a US\$ 70 para produção a partir da queima de gás natural e US\$ 60 a US\$ 90 no caso de usinas movidas a

²¹ Em 1990, a barragem de Balbina, concluída em 1987, emitiu 20 vezes mais gases para o aquecimento global do que geraria a mesma energia usando combustíveis fósseis, enquanto a barragem de Tucuruí, concluída em 1984, teve 0,4 vezes o impacto dos combustíveis fósseis. As hidrelétricas de Xingó, Itaipu e Segredo emitem pouco dióxido de carbono em comparação com suas térmicas equivalentes, onde o impacto é 137 vezes menor do que uma planta a gás natural; Miranda emite 11 vezes menos que uma planta a gás natural e Três Marias e Samuel emitem 2 vezes mais carbono, dados de 2002 (ROSA, 2002).

biomassa. No caso das usinas nucleares, as estimativas de custo variam entre US\$ 30 e US\$ 120 por MWh. A energia eólica apresenta custos que variam entre US\$40 e US\$70 por MWh (SCIENTIFIC AMERICAN, 2006).

O custo marginal da expansão, preço de leilão para consumidores cativos da distribuição, para usina de gás natural-ciclo combinado (incluindo transmissão) é de US\$ 79,3 /MWh, para usina a carvão é de US\$ 66,85 /MWh, usina de biomassa de bagaço de cana é de US\$ 50,25 /MWh, usina nuclear US\$ 58 /MWh, pequenas centrais hidrelétricas na faixa de US\$ 58 a US\$ 66,85 /MWh e para usinas hidrelétricas na faixa de US\$55,30 /MWh a US\$ 64,55 /MWh (CCE, 2006).

Os leilões de energia realizados em 2004 para comercialização de energia referente a usinas que estão em operação, denominadas velhas, para um mix de hidráulica e térmica é de US\$ 26,50 /MWh para entrega em 2005, US\$ 31 /MWh para 2006, US\$ 34,80 /MWh para 2007, US\$ 38,30 /MWh para 2008, US\$ 43,35 /MWh para 2009 e de US\$ 53 /MWh para 2010. Os valores para o leilão realizado no ano de 2006 para comercialização de energia hidráulica em 2009 foram de US\$ 54,40 /MWh e para 2011 de US\$ 57,65 /MWh (CCE, 2006).

No leilão para comercialização de energia de usinas em fase de construção, denominada nova, o valor para comercialização da energia para entrega em 2008 foi de US\$ 49,35 MWh para usina hidráulica e de US\$ 61,00 /MWh para térmica. Para entrega em 2009, para usinas térmicas, o valor foi de US\$ 59,60 /MWh e para 2010 de US\$ 56,15 /MWh (CCE, 2006).

O custo da geração eólica para aerogeradores com velocidade de 5m/seg, com altura de torre de 75m é de € 70 /MWh, torres de 55m € 88 /MWh e torres de 40 m é de € 95 /MWh. Para velocidade de 8m/seg, torres de 75 m apresenta um custo de € 20 /MWh, de 55 m de altura € 28 /MWh e para torres com altura de 40 m é de € 30 MWh (ANEEL, 2006).

O custo de geração solar, segundo a ANEEL, para tecnologia fotovoltaica fica na faixa de US\$ 250 a US\$ 500 /MWh, para a heliotérmica de torre central, na faixa de US\$ 100 a US\$ 250 /MWh, de cilindros US\$ 130 a US\$ 250 /MWh e a disco de US\$100 a US\$ 250 /MWh (ANEEL, 2006).

O fator de capacidade para energia solar é de 18%, a eólica é de 25 a 32%, da hidráulica de 45 a 75%, da térmica a gás natural ciclo combinado 92% e térmica a óleo 80%. A energia hidráulica e a térmica a gás natural ciclo combinado são as que apresentam melhor rendimento, as fontes renováveis de baixa emissão de carbono e que apresentam menores danos ambientais possuem menor rendimento, deixando de ser economicamente mais atraentes que as que atualmente predominam na matriz energética brasileira.

2.9- DESMATAMENTO VERSUS USINAS HIDRELÉTRICAS

As figuras 2.6 e 2.7 apresentam as localizações das usinas hidrelétricas acima de 30 MW e as pequenas centrais hidrelétricas (entre 1 MW e 30 MW) no estado de Goiás, juntamente com o desmatamento no período 2003 a 2005, obtidos a partir de imagens do Modis²² com filtro de 50 hectares de área mínima e 30% de variação, ou seja quaisquer mudanças com taxas menores que as estipuladas não foram reconhecidas pelo software como desmatamento. A figura 2.8 apresenta a localização das usinas termelétricas e o desmatamento de 2003 a 2005. Estão contempladas, nos mapas, as usinas em operação, construção e em viabilidade, de forma que se tem uma visão geral do conjunto de usinas, em médio prazo, no estado.

Pode-se observar, que não há influência das usinas hidrelétricas no desmatamento do estado. Não há, também, influência das termelétricas no desmatamento, nem mesmo a questão de plantio de cana-de-açúcar para abastecimento das usinas apresenta aumento nas proximidades das usinas. A maior concentração de desmatamento não se deve à instalação, nem ao desenvolvimento próximo a essas usinas, sendo assim a geração de energia elétrica não é uma das vilãs do desmatamento.

As concentrações a sul e a sudeste justificam-se pelo fato de serem áreas mais dinâmicas, onde está localizada grande parte das indústrias e da agricultura moderna, sob esse aspecto pode haver correlação positiva.

²² Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer

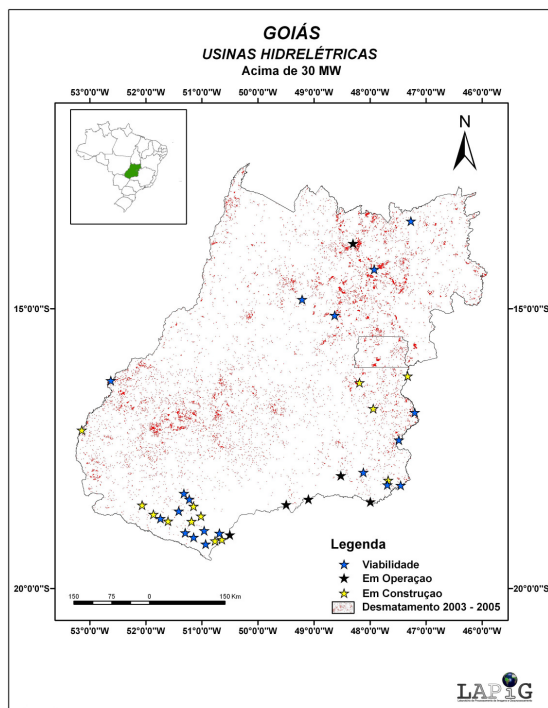


Figura 2.6 – Localização de usinas hidrelétricas (UHs) e desmatamento 2003-2005 em Goiás

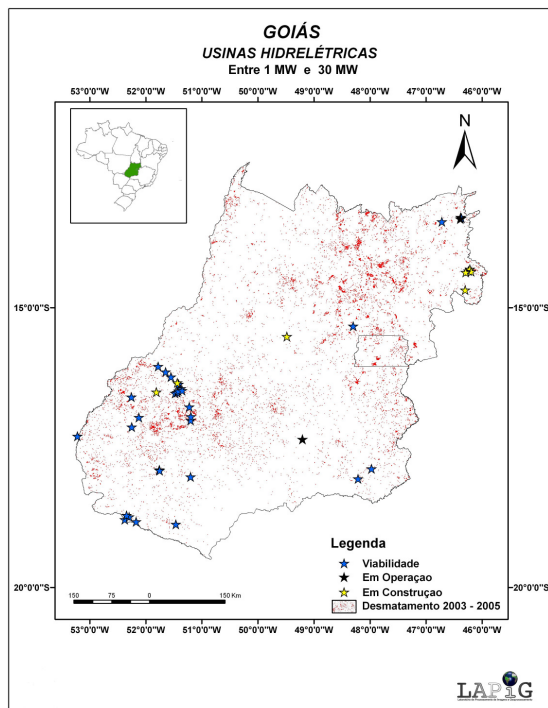


Figura 2.7 – Localização de usinas hidrelétricas (PCHs) e desmatamento 2003-2005 em Goiás

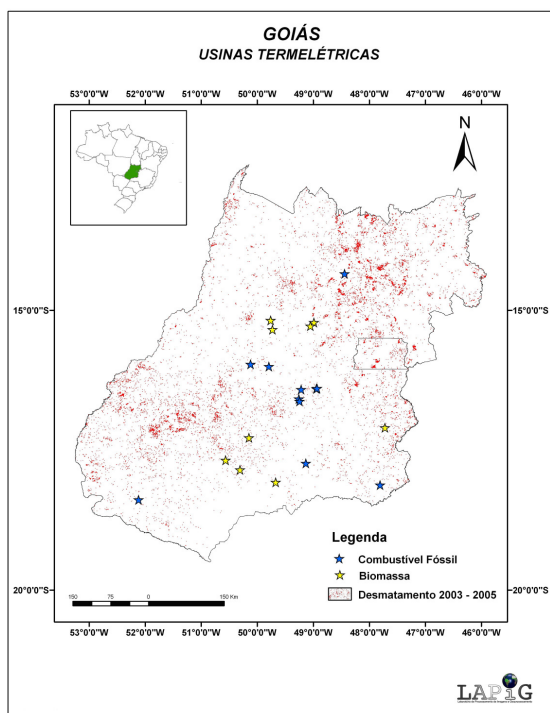


Figura 2.8 – Localização de usinas termelétricas e desmatamento 2003-2005 em Goiás

Capítulo 3

Energia Hidráulica: Operação de Reservatórios

Sendo a matriz energética brasileira marcada de forma predominante pela energia hidrelétrica, torna-se premente estudar os elementos intervenientes no processo de operação dos reservatórios, que se constitui na principal fase do processo. É perceptível a existência de grande número de reações próprias desse tipo de intervenção na natureza, o que afeta a produção de energia, inclusive na parte referente a custos e, além disso, acarreta danos ao meio ambiente. Todos esses fatores conduzem à necessidade de um trabalho minuciosamente planejado, dada sua complexidade e a difícil generalização dos métodos empregados.

A complexidade em manejar a qualidade da água de um reservatório reside na natureza dinâmica deste sistema, na interferência do homem e na variabilidade nos procedimentos de operação sobre os processos ecológicos. É indispensável o conhecimento da capacidade suporte do sistema, ou seja, saber o quanto o ambiente aquático permite ou mesmo estimula alterações nos processos físicos, químicos e biológicos, sem a perda da qualidade da água.

O ecossistema aquático apresenta variabilidade espacial e temporal que define elevado grau de incerteza com relação às comunidades fitoplancônicas. É relevante o conhecimento da dinâmica da comunidade fitoplancônica, pois as flutuações temporais e espaciais em sua composição e biomassa, podem ser indicadores eficientes das alterações naturais ou antrópicas nos ecossistemas aquáticos (HUSZAR e SILVA, 1999).

Eventos sazonais, tais como precipitação, estão entre os mais importantes fatores que influenciam o sistema aquático. Em regiões onde, tanto a intensidade quanto a quantidade de chuva variam de um ano para o outro e a temperatura flutua em faixa estreita, são gerados diferentes tipos de padrões que modificam a mistura da água e alteram a intensidade dos processos biológicos e ambientais que ocorrem na coluna d'água (GERALDES, 2004).

O gerenciamento das defluências de reservatórios tem sido, frequentemente, utilizado para alcançar a qualidade desejada da água em reservatórios. Defluências têm a habilidade de remover fósforo total do hipolímnio, porém a concentração final de fósforo total depende de múltiplos fatores (tempo de residência, afluência etc.) Afluências e defluências são capazes de

modificar o padrão de estratificação térmica em reservatórios, visto que são as fontes de energia potencial e energia cinética. (GAILLARD, 1984; FILHO et al. 1990; BARBIERO et al. 1997 apud TUZUN, 2006).

3.1- RESERVATÓRIOS

Reservatórios são estruturas da engenharia criadas com o objetivo de beneficiar a população, no que se refere à geração de energia, recreação, pesca comercial e esportiva, controle de cheias e suprimento de água. São ecossistemas artificiais, de uso múltiplo, apresentam padrão dinâmico e, são sistemas complexos de gradientes horizontais e verticais, que alteram as características hidrológicas e ecológicas de um rio. Qualquer impedimento destes usos múltiplos apresenta impacto direto nos benefícios a população.

Os reservatórios são regulados pelos seguintes fatores: morfometria, sazonalidade, sistema de operação, vazão e tempo de residência. Apesar dos reservatórios serem construídos pelo homem, seus ecossistemas ainda sim podem ser considerados “naturais”, no sentido de que sua biota não é cultivada e a composição de espécies é espontânea. Processos naturais são controlados por várias fontes simultaneamente e, os efeitos são inter-relacionados.

Reservatórios constituem um centro coletor de eventos que ocorrem em seu entorno, ou seja, atividades antropogênicas da bacia hidrográfica. Reservatórios em cascata, em um mesmo rio, onde as entradas em um reservatório são, em parte, reguladas pelas saídas do reservatório a montante, espera-se efeito crescente de controle em relação à qualidade da água, sendo o primeiro sistema geralmente mais eutrófico que os demais. No entanto, dependendo dos usos e da ocupação da bacia hidrográfica, o efeito crescente do controle da qualidade da água pode não ser observado (ESPÍNDOLA et al. 2002 a).

Uma das causas mais comuns de impedimento de uso do reservatório é a eutrofização, ou incremento da produtividade do lago, que é um processo natural, não necessariamente negativo. A eutrofização se torna problema quando os tributários trazem grandes quantidades de nutrientes (especialmente fósforo e nitrogênio) em escala de tempo pequena em relação à habilidade do sistema aquático de adaptar a essa carga. Os impactos normalmente se referem à recreação, manutenção do *habitat* e aumento de custos para uso de água para dessedentação humana (TUFFORD, 1999).

O rio define padrões de circulação no reservatório através da sua interação com a morfometria, transporte e gradientes de densidade. Muitos dos eventos externos que

influenciam o rio são sazonais, os quais aliados a morfometria, permitem o estabelecimento de diferentes *habitats* funcionais (TUFFORD, 1999). As fronteiras de um reservatório são definidas pela entrada de tributários, o reservatório propriamente dito, áreas alagadas e descontinuidades horizontais e verticais. Nessas fronteiras, a diversidade aumenta, bem como a produção, respiração e decomposição.

A barragem é um fator regulador de elevado significado quantitativo e qualitativo e, portanto, uma fronteira física e geográfica importante, pois possibilita pela sua estrutura e funcionamento interferir decisivamente nos sistemas, produzindo alterações substanciais na diversidade e nas variáveis físicas e químicas; pode ser um componente de alta tensão nos eventos nas represas a jusante (HENRY, 1999). Gradientes verticais de densidade constituem em represas, outra fronteira fundamental, produzindo distribuições verticais de organismos como plâncton e peixes e impossibilitando usos de água profunda do sistema.

As características específicas das represas (tamanho, profundidade, tempo de retenção e altura das descargas) afetam a limnologia do sistema e qualidade da água, as quais ainda se soma a manipulação deste ecossistema pelo homem. Os reservatórios são ecossistemas em permanente perturbação e descontinuidade vertical e horizontal. A variação hidrodinâmica pode ser muito grande, modificando processos químicos e biológicos. Alterações produzidas pelos pulsos em represas, resultantes da variação de força, podem resultar em efeitos catastróficos na estrutura e organização dos sistemas a montante ou a jusante (rio ou reservatório subsequente da cascata) (HENRY, 1999).

O ecossistema do reservatório é dinâmico, o qual pode ser observado, por exemplo, quando o nível de saída de água é alterado. A estratificação no corpo de água modifica em pequeno intervalo de tempo, o que cria profundas alterações na qualidade da água. Essa dinâmica deve ser considerada, pois alterações que objetivam a melhoria da qualidade da água podem levar a sua deterioração. Uma característica típica da dinâmica de ecossistemas é o efeito de realimentação entre seus componentes, fazendo com que às vezes, seja muito difícil separar claramente causa e efeito (STRASKRABA, 1993). O desenvolvimento de teorias para compreender e analisar a complexidade dos reservatórios é fundamental para acompanhar as mudanças periódicas e planejar usos múltiplos.

A construção de um reservatório produz inúmeros impactos nos sistemas terrestres e aquáticos, tais como: aumento de CO₂ no fundo do reservatório estratificado; perda de valor estético; perda de valor cultural e de referência cultural; perda de terra para agricultura; degradação da qualidade da água e perda de monumentos ou valor histórico.

A alteração de processos nos sistemas naturais, causadas pela construção do reservatório deve ser avaliada qualitativa e quantitativamente, a fim de produzir avaliações de impacto ambiental e desenvolver análises através da modelagem matemática das interações biológicas, no reservatório, suas respostas às ações antrópicas e as alterações na qualidade da água. O funcionamento do reservatório adaptado às características de construção, modifica as interações existentes, dando-lhe dinâmica temporal e espacial peculiar. Um fator fundamental no funcionamento de reservatórios é o tempo de retenção do reservatório, que é função dos usos da água (HENRY, 1999).

Nas etapas iniciais de formação de reservatórios, a incorporação da cobertura vegetal representa considerável fonte de detritos para esses sistemas. Nestas fases, são necessárias baixas concentrações de carbono para gerar grandes demandas de oxigênio, e conseqüentemente, o sistema aquático tende à anoxia. No início do processo de decomposição tende a ocorrer reduções nos valores de pH, como conseqüência a acidez aumenta o poder de corrosão da água, o que pode comprometer os equipamentos do sistema de geração de energia. A acidez leva também ao aumento das concentrações de íons da coluna de água e também ao aumento da dureza (CUNHA-SANTINO, 2002).

Durante a fase de enchimento, a vegetação nativa da área de inundação, ao entrar em contato com a água represada, é afogada, causando a liberação intensiva de elementos minerais e orgânicos, provenientes do processo de decomposição. A degradação dos recursos vegetais submersos na bacia de acumulação pode alterar a qualidade da água, em razão da eutrofização, das alterações no balanço de oxigênio dissolvido, da redução de pH, aumento da coloração e condutividade da coluna de água. Estes eventos podem comprometer, por longo período, o ecossistema aquático, os usos de água e os equipamentos das unidades geradoras de energia (CUNHA-SANTINO, 2002). Além das condições (físicas e químicas) do ambiente e da atividade heterotrófica dos decompositores, a qualidade e a quantidade dos recursos vegetais condicionarão a velocidade do processo de decomposição.

A adaptabilidade do reservatório para respostas às rápidas alterações de fluxo de água, tempo de residência e efeitos climatológicos, dependem da diversidade biológica, do grau de interação entre os componentes bióticos e abióticos. A alteração da estrutura organizacional pode ocorrer no caso de represas, por efeito climatológico, muito rápido (vento ou precipitação) que produz excessiva turbulência e altera a matriz hidrodinâmica vertical e horizontal da represa. As funções de força climatológica ou a operação da represa (mudança no tempo de retenção, mudanças na altura da saída da água) provocam a remoção de espécies e de populações, modificando substancialmente a estrutura espacial e temporal.

Há também alterações denominadas pulsos, que são definidos como mudanças rápidas naturais ou induzidas pelo homem e que afetam variáveis físicas, químicas ou biológicas dos reservatórios. Estes pulsos podem resultar da entrada de material e energia em um reservatório, tais como: água de precipitação ou vento, e/ou da saída de material tais como: a abertura de comportas. Estes pulsos podem ser freqüentes, estacionais ou ocasionais com magnitudes variáveis e efeitos diretos ou indiretos (HENRY, 1999).

Pulsos naturais podem ser ventos, precipitação, entrada de tributários. Pulsos artificiais podem ser abertura de comportas, flutuações no nível de água e grande movimentação de embarcações em pequenas represas. Pulsos ocasionais podem ocorrer com a quebra da termoclina, por ação do vento e redistribuição de organismos planctônicos na coluna de água. Baixa saturação de oxigênio causando mortalidade em massa de peixes a jusante, pode ocorrer quando pulsos rápidos de liberação de água das comportas ocorrem.

3.2- QUALIDADE DA ÁGUA

A qualidade da água em um reservatório é afetada pelas atividades humanas existentes em sua bacia hidrográfica, incluindo: lançamento de esgotos domésticos; escoamento de água da chuva de áreas agrícolas (em especial se houver criação de animais); água de chuva proveniente de regiões com poluição atmosférica, tais como: chuva ácida, percolação de lixões (chorume); compostos tóxicos oriundos de pesticidas utilizados na agricultura e reflorestamento; água de chuva contaminada por compostos orgânicos resistentes utilizados como catalisadores industriais; produtos farmacêuticos e dejetos hospitalares. Esses fatores induzem à degradação da qualidade da água, perda da diversidade biológica e desperdício de recursos hídricos (CARVALHO, 2003).

Fatores que afetam a qualidade da água: estratificação térmica; hidrodinâmica (tempo de retenção, balanço hídrico natural, evaporação); vento (favorece homogeneização); geologia e geografia da região e do reservatório. Em reservatórios, quanto à ótica da qualidade da água, tanto a localização da barragem em relação ao curso do rio, como sua altura determinam diversas características hidrológicas importantes como: as vazões, tipos de relevo do vale, temperatura das águas afluentes, insolação, turbidez, luminosidade das águas, e a química dos nutrientes que afetam sua biota.

O crescimento da agroindústria brasileira em algumas regiões tem sido muito alto nos últimos 20 anos. A biomassa de cultivos mono específicos e a necessidade de intensificar o

crescimento vegetal, pelo uso de fertilizantes, têm causado rápida eutrofização de rios e reservatórios que tem resultado num crescimento elevado de macrófitas aquáticas e altas concentrações de fósforo no sedimento. A taxa de urbanização tem crescido rapidamente, levando ao aumento de descarga de esgotos sem nenhum tratamento prévio. Estes dois processos são as principais causas da eutrofização em lagos e reservatórios brasileiros.

Com o aumento da degradação ambiental e o uso múltiplo de reservatórios é, de fundamental importância, proceder a avaliação da qualidade da água desses sistemas para o adequado gerenciamento de seus recursos.

O biomonitoramento é definido como o uso sistemático de respostas biológicas para avaliar alterações no ambiente dentro de programas de controle de qualidade. O biomonitoramento juntamente com observações e medidas de indicadores de qualidade biológicos, químicos e físicos, constitui excelente instrumento para a avaliação de qualidade da água.

Características físicas, químicas e biológicas em reservatórios são influenciadas pela flutuação sazonal do nível de água, que estão significativamente associados à utilização antropogênica (WETZEL, 1990 apud GERALDES, 2005).

As características físicas, químicas e biológicas do ambiente determinarão a ocorrência e distribuição dos diferentes organismos aquáticos. A alteração de qualquer uma dessas características pode causar alteração quantitativa no número de espécies e qualitativa, que pode levar ao desaparecimento ou substituição de espécies. Medidas capazes de detectar essas alterações, como índice de diversidade, índices bióticos e percentuais de organismos indicadores têm sido ferramentas úteis ao diagnóstico precoce da qualidade dos *habitats* aquáticos (CARVALHO, 2003).

Os dados de programas de monitoramento podem contribuir efetivamente para análise das tendências referentes à qualidade do ecossistema aquático e, permitem ações de prevenção e correção que diminuam custos de tratamento futuro, principalmente com relação à eutrofização.

A eutrofização é um dos maiores problemas de qualidade de água em reservatórios enfrentados pela comunidade européia e brasileira, que se deve ao aporte excessivo de nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio em fontes pontuais e/ou não pontuais, particularmente fósforo, cuja consequência é o desenvolvimento excessivo de organismos fitoplancônicos (CARVALHO 2003; GARNIER et al. 2005 e RUIZ-VERDÚ, 2005). Este processo traz consequências indesejáveis para a maioria dos usos de água pelo ser humano, especialmente para uso de água potável e para recreação.

Algas são necessárias para o ecossistema do reservatório. São fonte de energia necessária e, alimento para peixes e outros organismos aquáticos. Se sua concentração é muito alta, pode ocorrer: redução de claridade, floração nociva de algas na coluna d'água, baixa concentração de oxigênio dissolvido devido ao processo de decomposição e/ou problema de odor e paladar da água potável. Seu crescimento é função da luz, temperatura e disponibilidade de nutrientes.

O aumento do aporte de nutrientes decorre da alteração nos mananciais, como remoção de vegetação, desenvolvimento agrícola, industrial e urbanização. A relação entre o carregamento de nutrientes e a eutrofização é difícil de estabelecer a partir de dados coletados em pesquisas de qualidade da água, especialmente devido ao complexo mecanismo através do qual, condições hidrológicas e meteorológicas interferem com os nutrientes na determinação do desenvolvimento de alga (GARNIER et al. 2005).

A carga de nutrientes externos, de material orgânico e de poluentes normalmente aumenta com a intensidade de precipitação. A entrada de material no corpo d'água é maior no começo da época da chuva, do que no final do período chuvoso. Porém, tanto a intensidade quanto a magnitude da entrada de matéria depende do uso da terra, da cobertura da vegetação e declínio do terreno (GERALDES e BOAVIDA, 2005).

O desenvolvimento intenso de algas causa problemas para a produção de água potável, devido ao entupimento de filtros, elevação de pH, o que previne o uso de alumínio floculado no processo de tratamento e, libera carbono orgânico dissolvido que leva ao crescimento de bactérias em canos de suprimento de água potável (DE DIANOUS et al. 1995). A presença de algas causa sabores e odores desagradáveis na água pela produção de produtos metabólicos. A proliferação de espécies pertencentes ao grupo das cianofíceas, que podem ser tóxicas, afetam organismos aquáticos e humanos, tornando o custo de tratamento dessa água elevado. Estima-se que mais de 50% das proliferações de cianofíceas sejam tóxicas (CARVALHO, 2003 e COSTA & AZEVEDO, 2004)

Quanto à eutrofização, são várias as funções que a determinam, sendo as de importância fundamental a radiação solar incidente e a presença de nutrientes, mas há outros fatores que devem ser considerados, dentre eles a temperatura, a vazão, o processo de mistura, a pastagem por predadores, a química da água, o gás carbônico disponível, as características morfológicas do corpo d'água e a localização geográfica (ESPÍNDOLA, 2002 b).

As medidas a serem aplicadas para melhoria da qualidade da água em reservatórios podem ser de caráter não estrutural e estrutural (por exemplo: controle efetivo das afluições ao reservatório, não estrutural).

A restauração de corpos d'água através de medidas de controle de fósforo, difere categoricamente entre lagos rasos e lagos profundos estratificados. Redução de cargas de fósforo em lagos profundos normalmente produz certo grau de restauração no que se refere aos sintomas da eutrofização, o que já não ocorre em lagos rasos. Evidencia-se perda de depósito contínuo de nutrientes do epilímnio para o hipolímnio, durante o verão, em lagos profundos estratificados. O retorno desses nutrientes do hipolímnio só poderá ocorrer depois do outono, quando o lago se torna misturado novamente (TUZUN, 2006).

No contexto de redução de fontes pontuais de fósforo, espera-se que a entrada de fósforo difusa a partir de erosão do solo se torne a maior fonte, devido ao alto conteúdo no solo resultado de processos contínuos de fertilização. A determinação de fontes difusas de fósforo e nitrogênio baseia-se na distribuição dos tipos de uso do solo, por exemplo, florestas, solo arado e pastagens. Na Europa, redução de polifosfato nos sabões em pó reduziu o carregamento de fósforo nos corpos de água, assim como a melhoria no tratamento de água também reduziu as fontes pontuais (GARNIER et al. 2005).

Uma opção para a redução da quantidade de nutrientes é a construção de pré-reservatórios, que tem como função reter sedimentos antes da entrada do reservatório, aos quais estão associados grandes quantidades de fósforo. Outra opção é a substituição da massa de água do hipolímnio, de má qualidade, por água oxigenada, isenta de grandes quantidades de nutrientes, que pode ser alcançado por meio de bombeamento de água (circulação induzida ou forçada), de ar por dispersores que arejam a água do hipolímnio.

Outros métodos, que podem ser aplicados para garantir a qualidade da água são: remoção mecânica de algas e outras plantas aquáticas (caro, e pouco eficiente); controle biológico da biomassa (controle de fitoplâncton através de predadores, biomanipulação); e controle da entrada de radiação solar na água através da utilização de telas flutuantes (RAMOS, 2003).

3.2.1- ÍNDICES DE QUALIDADE

O conhecimento da qualidade dos recursos hídricos é essencial para seu manejo, sendo então conveniente a existência de um índice demonstrativo da qualidade das águas da bacia hidrográfica, que possa servir como informação básica para o público em geral, como subsídio para o gerenciamento ambiental.

A utilização de índices tem sido freqüente, em monitoramento ambiental. Esses índices são compostos, em geral, por fatores abióticos ou utilizam a estrutura das comunidades como matriz básica para seu cálculo, embora haja a necessidade de validação destes índices para os mais variados ambientes.

A utilização da comunidade zooplancônica, para se estabelecer um índice de avaliação do estado trófico do sistema aquático, requer a padronização da metodologia do estudo considerando vários aspectos, como natureza do sistema, tamanho dos corpos d'água, natureza da amostragem de escalas temporais e espaciais, entre outros, o que caracteriza a dificuldade de sua utilização. A utilização da comunidade fitoplanctônica para estabelecimento dos índices de qualidade, também, requer a realização de estudos comparativos e de padronização.

Índices tradicionais de diversidade, riqueza, dominância e equitabilidade em programas de biomonitoramento da qualidade da água tendem a não constituir bons indicadores, haja vista a necessidade de especialistas em taxonomia em níveis específicos.

As algas são avaliadas pela medição de concentração de clorofila-a no epilímnio do reservatório. A clorofila-a é um tipo de clorofila presente em todas as algas e, que pode ser usada como indicador de biomassa de algas. A avaliação do teor de clorofila-a é considerada uma medida rápida e eficiente da resposta da eutrofização em ambientes aquáticos. Entretanto, o conhecimento da comunidade fitoplanctônica é de extrema importância, frente a problemática que as algas, em especial as tóxicas, causam à qualidade da água.

Lagos podem ser classificados utilizando-se do índice de estado trófico, que é um indicador de biomassa de modo geral no reservatório ou lago. A forma mais comum de medida de biomassa para determinação do estado trófico é a clorofila-a.

Deve-se lembrar que o índice de estado trófico não é o mesmo que o índice de qualidade da água. Alguns índices de qualidade da água implicam em um julgamento subjetivo, que normalmente está relacionado ao uso da água e a atitude das pessoas. O índice de estado trófico não está ligado ao uso da água, ele descreve o nível de material biológico no lago (um lago oligotrófico poder ser bem avaliado aos olhos de um banhista e não tão bem por um pescador). Daí a necessidade de normas, como a do CONAMA²³, que relacionam esses índices (por exemplo, clorofila-a) com um tipo de uso específico da água.

Considerando a aplicabilidade em programas de biomonitoramento, a identificação mais detalhada é morosa, além de necessitar de profissionais com nível de conhecimento específico

²³ Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA

para cada grupo. Assim, Carvalho (2003) acredita que para uma resposta mais rápida na avaliação da qualidade da água, que fornece subsídios para ações imediatas, é possível utilizando a identificação em grandes grupos ou a observação da espécie dominante. Essa técnica mostrou-se, ainda, mais eficiente quando se alia o parâmetro clorofila-a, a carga de fósforo e a comunidade fitoplanctônica.

A- ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO (IET)

Tem por finalidade classificar os corpos d'água em diferentes graus de trofia, ou seja, avaliar a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes.

O índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo et al. (1983) e Toledo (1990) baseia-se em dados de diferentes reservatórios do Estado de São Paulo, feitos alguns ajustes na fórmula original. De acordo com Carvalho (2003), o índice utilizado foi composto apenas pelo índice do estado trófico de fósforo total (IET_p) e o índice de estado trófico de clorofila-a (IET_{cl}), sendo o fósforo (P) medido em mg L⁻¹ e a clorofila (CL) em µg L⁻¹.

Os índices de estado trófico para fósforo e clorofila são definidos como:

$$IET_p = 10 \left(6 - \frac{\ln(80,32/P)}{\ln 2} \right) \quad (3.1)$$

$$IET_{cl} = 10 \left(6 - \frac{2,04 - 0,695 \ln CL}{\ln 2} \right) \quad (3.2)$$

Sendo que o índice IET final é dado por:

$$IET = \frac{IET_{cl} + IET_p}{2} \quad (3.3)$$

Onde:

P = fósforo em mg L⁻¹

Cl = Clorofila em µg L⁻¹

O critério utilizado para a avaliação do estado trófico da água está representado na tabela 3.1, para finalidades de diagnóstico:

Tabela 3.1- Critério de classificação do estado trófico da água segundo o IET

Critério	Classe do IET	Classificação
$IET \leq 44$	1	Oligotrófico
$44 < IET < 54$	2	Mesotrófico
$54 \leq IET < 74$	3	Eutrófico
$IET \geq 74$	4	Hipereutrófico

Os índices de riqueza e de dominância foram calculados de acordo com as fórmulas propostas por Simpson (1949, apud ODUM, 1988):

$$d = \frac{S - 1}{\log N} \quad (3.4)$$

$$c = \sum \left(ni \frac{ni}{N} \right)^2 \quad (3.5)$$

Onde:

d = índice de riqueza

c = índice de dominância

N = número de amostras

ni = concentração da iésima espécie

B- ÍNDICE DE COMUNIDADES AQUÁTICAS – FITOPLÂNCTON E ÍNDICE DE COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA COM O IET

O índice de Comunidades Aquáticas – Fitoplâncton foi elaborado pela CETESB, juntamente com o Instituto de botânica e Universidade Federal de São Carlos.

O índice visa categorizar a qualidade da água em quatro níveis através da proporção dos grandes grupos que compõem o fitoplâncton, da concentração de clorofila-a e da densidade dos organismos. Estabeleceu-se então uma média que determina a classificação mostrada na tabela 3.2.

Tabela 3.2- Categorias de qualidade da água, utilizando clorofila-a, densidade e dominância de algas fitoplantônicas.

Ponderação	Níveis	Categoria
1	Não há dominância entre os grupos Densidade total $< 1000 \text{ org mL}^{-1}$ Clorofila-a $\leq 4 \mu\text{g L}^{-1}$	Ótima
2	Dominância de Clorofíceas (Desmidiáceas) ou Diatomáceas Densidade total $> 1000 \text{ org mL}^{-1}$ e $< 5000 \text{ org mL}^{-1}$ Clorofila-a $> 4 \mu\text{g L}^{-1}$ e $< 10 \mu\text{g L}^{-1}$	Razoável tendendo para boa
3	Dominância de Clorofíceas (Chlorococcales) Densidade total $> 5000 \text{ org mL}^{-1}$ e $< 10000 \text{ org mL}^{-1}$ Clorofila-a $> 10 \mu\text{g L}^{-1}$	Razoável tendendo para ruim
4	Dominância de Clorofíceas ou Euglenofíceas Densidade total $> 10000 \text{ org mL}^{-1}$ Clorofila-a $> 10 \mu\text{g L}^{-1}$	Ruim

Fonte: CARVALHO, 2003

Substituindo-se a concentração de clorofila-a pelo IET, obtem-se a tabela 3.3, de forma que reservatórios que possuem carga elevada de nutrientes, principalmente o fósforo e, também, carga elevada de contaminação que inibe o crescimento de algas, estariam melhor representados, conforme trabalho realizado por Carvalho, (2003).

Tabela 3.3- Categorias de qualidade da água, utilizando IET

Ponderação	Níveis	Categoria
1	Não há dominância entre os grupos Densidade total $< 1000 \text{ org mL}^{-1}$ IET ≤ 44	Ótima
2	Dominância de Clorofíceas (Desmidiáceas) ou Diatomáceas Densidade total $> 1000 \text{ org mL}^{-1}$ e $< 5000 \text{ org mL}^{-1}$ $44 < \text{IET} \leq 54$	Boa
3	Dominância de Clorofíceas (Chlorococcales) Densidade total $> 5000 \text{ org mL}^{-1}$ e $< 10000 \text{ org mL}^{-1}$ $54 \leq \text{IET} \leq 74$	Regular
4	Dominância de Clorofíceas ou Euglenofíceas Densidade total $> 10000 \text{ org mL}^{-1}$ IET > 74	Ruim

Fonte: CARVALHO, 2003

A composição da comunidade fitoplantônica é influenciada por um conjunto de variáveis climatológicas e abióticas. A chuva tem forte influência na composição de espécies fitoplantônicas e na biomassa total, atuando como um fator diluidor e como fator de perturbação das comunidades aquáticas. A estação seca, onde ocorre a instabilidade na coluna

d'água, é um fator determinante nas mudanças da comunidade fitoplanctônica (CARVALHO, 2003).

O tempo de retenção tem importante papel na seqüência temporal da dinâmica da comunidade fitoplanctônica, visto que os pulsos produzidos interferem na composição da comunidade fitoplanctônica. Sabe-se que, são requeridos tempos de retenção de duas ou três semanas, para permitir crescimentos significativos de organismos fitoplanctônicos (CARVALHO, 2003). Segundo De Fellipo (1999), sistemas com tempo de retenção curto tendem a sofrer forte influencia fluvial, durante a estação chuvosa, observando-se variações sazonais na composição e abundância de espécies. Segundo Straskraba e Tundisi (2000), os reservatórios podem ser divididos em classes segundo seu tempo de retenção. As três principais classes são:

- Classe A: reservatórios com correntes longitudinais rápidas, tempo de retenção $R \leq 15$ dias, nesta classe a mistura é completa;
- Classe B: tempo de retenção intermediário, com $15 \text{ dias} < R < 1 \text{ ano}$;
- Classe C: tempo de retenção longo, $R > 1 \text{ ano}$.

A dinâmica de estratificação e circulação da coluna d'água têm importante papel no funcionamento de reservatórios. A ocorrência de descontinuidade térmica estratifica o ambiente física, química e biologicamente. A estratificação influencia a distribuição vertical e o fluxo de nutrientes. A assimilação de nutrientes pelo fitoplâncton, nas camadas superiores, em ambientes estratificados, normalmente pode resultar em limitação desses nutrientes embora estejam disponíveis nas camadas inferiores (CALIJURI et al. 1999).

Estratificação térmica caracteriza-se pela mistura da água em dias de temperatura baixa. Em dias de temperatura elevada (verão, dias quentes e longos), a temperatura da superfície da água se eleva, devido à diferença de densidade entre a água quente e fria. A água quente flutua sobre a água fria inibindo a mistura das camadas. Com a camada inferior estagnada, não ocorre troca de oxigênio com o ar ou com a camada superficial rica em oxigênio, com isso o nível de oxigênio dissolvido na camada inferior fica deplecionado. Para níveis de oxigênio extremamente baixos, próximo ao sedimento, níveis indesejáveis de ferro, manganês e sulfeto podem ser liberados do sedimento causando problemas de odor e gosto na água, o que acarreta aumento do custo de tratamento da água.

A entrada de nutrientes, fósforo e nitrogênio através da erosão, plantas de tratamento de esgoto, entre outros, também acelera esse processo. Quanto maior a quantidade de nutrientes,

maior o crescimento de algas, o que aumenta a sedimentação de matéria orgânica, que por sua vez aumenta a demanda de oxigênio próximo ao fundo do reservatório.

O oxigênio dissolvido é um dos mais importantes na dinâmica e na caracterização de ecossistemas aquáticos. As perdas de oxigênio estão relacionadas ao consumo pela decomposição de matéria orgânica, perdas para a atmosfera, respiração de organismos aquáticos e oxidação de íons. Carvalho (2003) mostrou o oxigênio dissolvido como sendo de importância significativa para a comunidade fitoplanctônica, pois selecionou espécies que podem ser indicadoras de qualidade ambiental.

As medidas de condutividade podem auxiliar na detecção de fontes de poluição em ecossistemas aquáticos, sendo uma variável importante para classificação de reservatórios. (BRANCO, 1986; CARVALHO, 2003).

A transparência é uma variável que está intimamente relacionada com a comunidade fitoplanctônica, visto que os organismos dependem da luz para a realização da fotossíntese. No estudo de Carvalho (2003), os reservatórios estudados mostraram a relação das variáveis: oxigênio dissolvido, condutividade e transparência com a comunidade fitoplanctônica, e sua influência na riqueza e densidade.

A eutrofização é tipicamente acompanhada pelo decréscimo da razão nitrogênio e fósforo, N:P (SMITH, 1990), a qual é devido ao aumento no teor de fósforo. O decréscimo de N:P favorece a substituição de clorofíceas por cianofíceas (REYNOLDS, 1987). A razão N:P tem sido utilizada como um dos principais estimadores do grau de trofia dos ambientes aquáticos (SALAS e MARTINO, 1991). Em lagos, com razão N:P maior que 9, o fósforo foi considerado como fator limitante e, em águas com razão N:P menor que 9, o nitrogênio é limitante. Segundo Carvalho (2003), existe relação positiva entre o aumento de nutrientes e a produtividade em lagos, ambientes considerados eutrofizados ou com tendência à eutrofização, apresentam elevados valores de densidade média.

Estudos da qualidade da água realizados por Geraldine e Boavida (2005), indicaram que mudança na temperatura da água e o aumento de concentração de nitrogênio na coluna d'água, são os responsáveis pela mudança na composição da comunidade de algas, aliados à redução de penetração de luz na coluna d'água causado por aumento de particulados associados às mudanças nos zooplânctons. Segundo Bozelli (2003) e Huszar e Silva (1999), as seqüências sucessionais de plâncton estão relacionadas, predominantemente, aos aspectos físicos dos ambientes, como episódios de circulação vertical e horizontal da água, mais do que a disponibilidade de nutrientes.

Segundo Azevedo (2001), para a formação de cianofíceas são necessárias certas condições ambientais, como níveis elevados de nutrientes, temperatura da água variando entre 15 a 30 °C, pH de 6 a 9 ou até mais, ventos de moderados à ausentes, baixa turbulência e velocidade da água e, alta insolação. Seus processos vitais requerem somente água, dióxido de carbono, substâncias orgânicas e luz. São provavelmente os primeiros produtores primários da matéria orgânica a liberarem oxigênio elementar na atmosfera primitiva.

3.3- MONITORAMENTO DE ALGAS PARA DETERMINAR A QUALIDADE DA ÁGUA

Um dos principais indicadores da qualidade da água doce é a biomassa e a composição do fitoplâncton. A análise da comunidade fitoplanctônica é de significativa importância para que se obtenha compreensão adequada das condições existentes no meio aquático. Os organismos desta comunidade, por viverem em suspensão, respondem em dias às alterações ambientais decorrentes da interferência antrópica ou natural, que provocam mudanças na sua composição, estrutura e taxa de crescimento (CARVALHO, 2003; BOZELLI, 2003). Este grupo de organismos são os principais produtores primários no corpo d'água, utilizando da luz solar para realizar a fotossíntese.

As algas são grupos de organismos altamente diversificados que podem ser encontrados em quase todos os habitats (terrestre e aquático). A interação entre os fatores ambientais e processos fisiológicos, operando em faixa de diferentes escalas, influi nas espécies que serão encontradas em amostra específica. Vários destes fatores podem ser modificados pelas atividades humanas, visto que o conhecimento do impacto dessas atividades tem crescido ultimamente, tem sido possível inferir e prever sobre condições ambientais, baseando-se unicamente nas algas encontradas na área de estudo.

O uso de algas com a finalidade de determinar condições ambientais teve início com Kolkwitz e Marson, em 1908 e 1909 respectivamente, somente nas últimas duas décadas do século 20, que métodos baseados em algas têm assumido papel promissor como ferramenta das organizações reguladoras. Além das algas, quem desempenha com maior representatividade esse papel são os métodos baseados em invertebrados. Sabe-se que variáveis físico-químicas não são suficientes para avaliar a integridade ecológica dos ambientes aquáticos, sendo necessária abordagem integrada com os dados das comunidades biológicas, como a planctônica e a bentônica (CARVALHO, 2003).

Uma das principais áreas, onde as algas são utilizadas para monitoramento ambiental é no caso da eutrofização (poluição por nutrientes inorgânicos). Os fatores químicos responsáveis pela eutrofização (fósforo e nitrogênio) são de relativamente fácil medida em laboratório, porém apresentam variação espacial e temporal. Os efeitos da eutrofização não são causados diretamente pelos fatores químicos propriamente ditos, mas sim, pela resposta dos organismos aquáticos (particularmente algas, que assimilam esses nutrientes) a estes elementos, o que justifica o monitoramento baseado em algas em estudos de eutrofização. Através do processo de fotossíntese e metabolismo, as algas podem modificar o pH, a alcalinidade, a cor e a turbidez da água (BRANCO, 1986).

Outra situação na qual as algas são preferidas a outros organismos para monitoramento em rios profundos, túrgidos, canalizados e altamente poluídos, visto que nestas condições técnicas de monitoramento baseadas em invertebrados são limitadas pelo habitat e técnicas de amostragem (PEREIRA et al., 2003).

Apesar dos objetivos do monitoramento biológico serem largamente aceitos, a maioria das normas se baseia em medidas de variáveis químicas, sendo o papel do monitoramento biológico de subsidiar o monitoramento químico. Vários trabalhos reforçam a importância da inserção de medidas biológicas na avaliação da resposta ao desequilíbrio ambiental (CARVALHO, 2003; LORENZETTI, 2002).

As estratégias de amostragem são de alta relevância no monitoramento biológico. O tempo curto de geração de várias microalgas, associado com sua susceptibilidade a eventos hidrológicos, significa que a escala temporal é um fator importante quando da elaboração de programas de monitoramento. Dados básicos coletados com maior frequência têm maior representatividade, que os coletados com menor frequência, no sentido de detecção de mudanças (sensibilidade e análise estatística em função da escala).

Devido ao impacto da eutrofização no suprimento de água e no valor estético de lagos, várias são as tentativas de utilização das algas como parte de programas de monitoramento e gestão. Os estudos de monitoramento podem ser realizados através de medidas diretas e indiretas de fitoplâncton, respectivamente, identificação de alguns ou todos os táxons através de contagem manual; e, medidas de concentração de clorofila e turgidez. A análise de clorofila-a pode ser realizada rapidamente e de forma barata, é, assim, utilizada como indicativo da biomassa fitoplancônica e, em programas de monitoramento da qualidade da água. É coletada e analisada, juntamente com elementos químicos, durante rodadas de amostragem de rotina. Devido ao baixo custo em relação aos métodos diretos, garante-se uma

amostragem mais freqüente. Turbidez é medida mais facilmente como o inverso da transparência do lago, in loco com o disco de Secchi (PEREIRA, 2003).

Um ponto importante do monitoramento do fitoplâncton pelas autoridades reguladoras é a determinação da floração de algas tóxicas (cianobactérias), algas verdes. Diferentes tipos de algas apresentam diferentes comportamentos sazonais, melhor base para um modelo preditivo do comportamento do fitoplâncton, seria a da clorofila e, dados de identificação e enumeração (composição e abundancia de espécies) (PEREIRA, 2003).

A clorofila-a é a medida mais prática e direta de produtividade de algas e resposta a eutrofização em lagos. Vários estudos têm relacionado a clorofila-a, ou outros aspectos de cultura de algas, aos aspectos de qualidade de água com impacto direto nos diversos usos da água, incluindo transparência, depleção de oxigênio dissolvido, produção de peixes, odor e gosto da água e toxicidade das algas verdes (WALKER, 2005).

A concentração de clorofila (excluindo feoftina) é utilizada como principal medida de biomassa de algas. Normalmente, os teores de feoftina mostram padrão inverso ao da clorofila-a, visto que a feoftina é um dos produtos de degradação da clorofila (ESTEVES, 1998). Em ambientes eutróficos, as concentrações de clorofila-a são maiores na superfície e diminuem em direção ao fundo (MARIANI, 2006). Turbidez é geralmente atribuída a sólidos suspensos inorgânicos, originados das margens ou de sedimentos do fundo em suspensão. A temperatura influencia na densidade da água, na capacidade de saturação de OD, no pH e na condutividade elétrica (esses fatores físico-químicos acompanham de modo geral a tendência da temperatura) (MARIANI, 2006). A produtividade das algas é limitada por luz e/ou disponibilidade de nutrientes.

A qualidade da água nos vários estudos de reservatórios realizados por Walker (2005), difere significativamente em termos de transparência, concentração de sólidos suspensos, nitrogênio, fósforo e clorofila-a. Nestes estudos, observou-se que a clorofila-a é inversamente proporcional à transparência; que a baixa transparência se deve mais a presença de sólidos suspensos inorgânicos do que ao crescimento de algas. Na realidade, a alta concentração de sólidos suspensos provavelmente inibe o crescimento de algas, através da limitação de penetração de luz. Porém, em lagos onde a concentração de sólidos suspensos é baixa, o fator dominante na redução de transparência é a presença de algas.

Estudo realizado por Walker (2005), avaliou se transparência ou clorofila-a forneceriam maior correlação aos impactos no uso para recreação, devido ao crescimento de algas. A correlação foi maior com clorofila-a do que com transparência, portanto a melhor escolha como padrão de análise é a clorofila. Os critérios de clorofila-a e nutrientes para lagos e

reservatórios são expressos em valores sazonais médios. O uso de valores médios de clorofila-a, como medida relativa da condição de lagos, tem certas vantagens: apresenta menor variância, sendo mais confiável para condições de dados limitados e, valores médios são comumente utilizados na classificação de lagos. Trabalhou-se com valores máximos e médios. Os valores máximos sazonais de clorofila-a foram em média 1,66 vezes o valor médio de clorofila-a.

Dados de abundância de macro algas podem ser utilizados em monitoramentos práticos. Um exemplo é o índice de abundância de algas (AAI). Pereira et al.(2003) apresenta a relação do índice de abundância, com as concentrações de fósforo em um rio.

Uma forma de se eliminar o problema da variabilidade temporal é a realização de visitas repetidas ao local. A variabilidade espacial deve, também, ser levada em consideração para escolha do local de análise (por exemplo: presença de saída de esgoto).

Em algumas circunstâncias, o crescimento excessivo de algas pode ser causado pela falta de predadores e, não, pelo excesso de nutrientes. A disponibilidade de luz e a temperatura da água são fatores igualmente importantes que influenciam na biomassa de macro algas. É importante estender o tempo de amostragem por vários anos, a fim de entender a variação de um ano para outro e, de reduzir a probabilidade de um ano atípico influenciar na interpretação.

A habilidade de macro algas, de acumular metais pesados, levou ao uso das mesmas, como ferramenta de monitoramento em água doce e salgada. As algas indicam a presença de descargas intermitentes em rios, ou pontos quentes de poluição por metais, em estuários onde as concentrações de metais são altamente variáveis devido às marés. O uso de algas não se aplica somente ao monitoramento de metais pesados, mas também “radionucleotídeos” e pesticidas.

Foram desenvolvidos índices de poluição em função dos táxons. Alguns países, como os de língua francesa, tenderam a desenvolver índices de qualidade de água baseados na identificação das espécies (táxons). Outra aplicação, é o uso de técnicas estatísticas para relacionar pH ótimo e suas tolerâncias com a taxonomia. O uso da diversidade de espécies como medida de poluição mostrou-se ineficiente (PEREIRA, 2003).

O papel do fitoplâncton, estabelecer o estado trófico dos lagos, compreende determinar se essas mudanças são de origem antrópica. O objetivo é desenvolver um índice artificial de integridade biológica, que envolve comparação estatística entre um local a ser estudado (exemplo) e, um grupo de locais referências, relativamente não afetados que, correspondam, ao local de interesse em suas características físicas geomorfológicas.

O monitoramento baseado em algas é um campo grande e difuso. Na literatura, ele apresenta grandes idéias, mas alguns não sobrevivem à transição acadêmica para prática. Existe a necessidade de técnicas consistentes e confiáveis, que possam ser realizadas por vários anos, a fim de prover uma idéia da variação ano a ano (PEREIRA, 2003).

3.4- CONSEQÜÊNCIAS DA ALTERAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

A eutrofização produz mudanças na qualidade da água tais como: redução de oxigênio dissolvido; perda das qualidades cênicas; aumento do custo de tratamento; morte extensiva de peixes; aumento da incidência de florações de microalgas; e, cianobactérias e outras formas de degradação.

A qualidade da água influencia na corrosão das tubulações de usinas hidrelétricas e unidades de tratamento de água. A corrosão pode resultar na liberação de metais tóxicos, causando fissuras nas tubulações, redução da capacidade de carregamento hidráulico dos canos e vazamentos ou entupimentos.

Inúmeros fatores físicos, químicos e biológicos podem afetar a ocorrência e a taxa de corrosão. Alguns fatores individuais podem promover, ou inibir a corrosão, dependendo de outras condições, dentre eles os mais significantes estão relacionados abaixo (KELLY, 2004):

- velocidade do fluxo de água: altas velocidades aumentam a taxa de transferência de material das paredes da tubulação. Isto pode aumentar a corrosão, através do aumento da taxa de transferência de oxigênio, ou pode inibir, na qual uma camada de proteção pode se formar.
- temperatura: em geral, como em todas as reações químicas, a taxa de corrosão aumenta com o aumento da temperatura. Entretanto, a temperaturas mais altas, o carbonato de cálcio tem uma elevada tendência de se precipitar e, formar camada protetora ao longo das paredes do tubo.
- pH: pH é inversamente proporcional à concentração de íons de hidrogênio na água. Como esses íons agem como receptores de elétrons na reação da corrosão, baixos pHs ajudam a promover a corrosão. Para valores de pHs abaixo de 5, ferro e cobre corroem rapidamente e uniformemente. Acima de pH 9, ambos metais normalmente são protegidos de corrosão.

- alcalinidade: é composta, na sua maioria, de íons de carbonato e bicarbonato. Ela provê à água capacidade de neutralizar mudanças no pH.
- oxigênio dissolvido: o oxigênio é considerado o principal agente em reações de corrosão eletromecânica. É a substância que recebe o elétron doado pelo metal, no anodo da célula de corrosão, à medida que ela é corroída. Oxigênio reage com metais ferrosos solúveis, produzidos pela corrosão, para formar hidróxido de ferro insolúvel.
- sólidos totais dissolvidos: altos valores de sólidos totais dissolvidos indicam elevada concentração de íon na água, que por sua vez aumenta a condutividade, levando a maiores fluxos de elétrons e, por conseguinte, ajuda a promover a corrosão eletromecânica.
- dureza: dureza resulta da presença de íons de cálcio e magnésio. Água dura é normalmente menos corrosiva do que água menos dura.
- bactéria: bactérias se presentes em um biofilme conectada à tubulação podem criar mudanças localizadas de pH e oxigênio dissolvido que podem promover corrosão eletromecânica.

No caso da presença de cianofíceas, vários gêneros e espécies que formam florações, podem liberar toxinas na água capazes de causar a morte de animais domésticos e intoxicação de seres humanos seguido de morte. Algumas dessas toxinas têm ação rápida, as neurotoxinas e algumas possuem ação mais lenta, as hepatotoxinas, que são os dois grupos até o momento caracterizados. Os principais tipos de intoxicação incluem distúrbios hepáticos, neurológicos, gastrointestinais e reações alérgicas. Aproximadamente, 75% das cepas isoladas se mostram tóxicas, quando testadas em bioensaios de toxicidade, sendo que apenas uma delas é produtora de neurotoxinas, enquanto que as demais hepatotóxicas. O tipo mais comum de intoxicação envolvendo cianobactérias é causado por hepatotoxinas. Existe grande dominância de casos relatos em países do hemisfério Norte, em função da maior preocupação e, investimentos nessa linha de monitoramento e pesquisa. No Brasil, estudos realizados pelo grupo de pesquisa da UFRJ, confirmaram a ocorrência de cepas tóxicas de cianobactérias em reservatórios dos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Paraná, Bahia, Pernambuco e Distrito Federal (AZEVEDO, 2001; CARVALHO, 2003).

Algumas espécies, identificadas como produtoras de hepatotoxinas, estão incluídas nos gêneros *Microcystis*, *Anabaena*, *Nodularia*, *Oscillatoria*, *Nostoc* e *Cylindrospermopsis*.

Recentemente, observou-se que *Cylindrospermopsis raciborskii* causa severos danos renais aos animais testados (HUSZAR e SILVA, 1999; AZEVEDO, 2001; CARVALHO, 2003).

Casos de mortes de animais domésticos foram relatados na Austrália e intoxicações de populações humanas por cianobactérias pelo consumo oral de água, foram descritas em diversos países como Austrália, Inglaterra, China e África do Sul (CARVALHO, 2003).

No Brasil, os primeiros casos registrados com mortes humanas, relacionados às cianobactérias, ocorreram em 1996 em Caruaru, Pernambuco, onde pacientes com doenças renais crônicas morreram, após terem sido submetidos a sessões de hemodiálise em uma clínica que era abastecida por água de um açude, em que havia floração de cianofíceas (quadro clínico compatível com uma grave hepatotoxicose). Existe forte evidência de correlação entre a ocorrência de florações de cianobactérias, no reservatório de Itaparica (Bahia) e a morte de 80 pessoas, pelo consumo de água do reservatório em 1988 (AZEVEDO, 2001; CARVALHO, 2003). Após esse episódio, foi incluído o monitoramento de cianofíceas em mananciais de abastecimento público.

Um tratamento de água convencional utilizando floculação, precipitação, filtração e cloração não é o suficiente para remover toxinas de cianobactérias, principalmente de mananciais apresentando altos níveis de eutrofização, com dominância de cianobactérias. As cianobactérias causadoras de danos desaparecem do reservatório, antes que as autoridades de saúde pública considerem floração como possível risco. Daí, a necessidade de implantação de programas de monitoramento, para alertar as autoridades sobre a presença de cianotoxinas e melhoria das técnicas de tratamento de água, que permitam a sua remoção da água tratada, em virtude da ocorrência de espécies potencialmente produtoras dessas substâncias em reservatórios brasileiros. Cerca de 50% de todas as florações testadas, em bioensaios, em diferentes países, se mostraram tóxicas (AZEVEDO, 2001).

A exposição prolongada a cianotoxinas, deve ser considerada como sério risco à saúde. No caso de hepatotoxinas pode levar a maior incidência de câncer hepático. Limites que são aplicados às cianotoxinas são: Organização Mundial da Saúde editou um guia específico para toxinas de cianobactérias em águas e abastecimento público, onde foi estabelecido o limite de 1,0 mg/L, como máximo aceitável para consumo oral humano diário.

Segundo Matsuzaki (2004), a acumulação e a persistência das microcistinas nos tecidos musculares de *Tilapia rendalli* que se alimentaram continuamente de cianofíceas tóxicas, no Lago de Jacarepaguá foi constatada. Mesmo depois do declínio da floração de cianofíceas, as toxinas continuaram a ser detectadas na carne e no fígado dos peixes, mostrando o alto risco de consumo desses peixes.

No caso de toxicidade sub-letal, os animais (moluscos, peixes e lagostas) conseguem sobreviver tempo suficiente para acumular as toxinas e transferí-las ao longo da cadeia alimentar, oferecendo risco ao consumo humano (MATSUZAKI, 2004).

3.4.1-FLORAÇÕES IDENTIFICADAS

As cianofíceas ou cianobactérias podem obter fósforo do sedimento, de modo a seu estoque interno capacitá-las a sustentar seu crescimento na região pelágica, em detrimento a outros grupos de algas. A diminuição de transparência da água e o aumento da turbidez, estão normalmente associados aos períodos de floração. Algumas espécies são potencialmente tóxicas e, formam florações que interferem com a utilização dos corpos d'água (por exemplo, *Cylindrospermopsis raciborskii*²⁴).

Florações de *Microcystis* foram identificadas no Lago das Graças (Parque do Estado, São Paulo) (BICUDO et al, 1999; TUCCI, 2006). Segundo relatório do monitoramento limnológico e de qualidade da água, realizado pela Empresa Multigeo, do Reservatório de Serra da Mesa em 2003, foram encontradas florações de *Microcystis* e *Cylindrospermopsis raciborskii* (MULTIGEO, 2003). Segundo Carvalho (2003), o reservatório de Billings apresentou floração de *Microcystis*, em todas as campanhas analisadas, enquanto que, o reservatório de Itupararanga apresentou valores altos deste mesmo gênero na primavera, estando associado provavelmente ao longo tempo de residência, transparência da água, altos valores de pH. Porém segundo Nogueira (1997), apud Carvalho (2003), a dominância de *Microcystis* esteve fortemente relacionada à estratificação térmica e, também à outros fatores ambientais, tais como: aumento da estabilidade térmica, valores de pH, redução da razão zona eufótica/zona afótica, da profundidade da zona de mistura e da razão N/P. Outras espécies consideradas potencialmente tóxicas, identificadas no reservatório de Billings, foram: *Cylindrospermopsis raciborskii*, *Radiocystis fernandoii*, *Microcystis aeruginosa*, *Anabaena solitaria* e *Anabaena spiroides*.

²⁴ O sucesso ecológico de *Cylindrospermopsis raciborskii* está diretamente relacionado a vários fatores: capacidade de migração na coluna d'água, tolerância a baixa luminosidade, habilidade em utilizar fontes internas de fósforo, alta capacidade de absorção de fosfato e amônia, fixação de nitrogênio atmosférico, alta capacidade de dispersão (acinetos resistentes, dispersão por cursos de rios, aves, etc).

Segundo Carvalho (2003), as espécies de *Microcystis* são encontradas, tanto em lagos estratificados, como em condição de mistura, pois através dos aerótopos estas têm a vantagem de se deslocar na coluna d'água. Estudos nos reservatórios de Billings, Itupararanga e Ponte Nova (porém com menor frequência e abundância neste último) demonstram que a *Cylindrospermopsis raciborskii* apresenta dominância com altas temperaturas (verão) e períodos de maior pluviosidade (chuvosos), fato que corrobora o que já havia sido descrito por vários pesquisadores, períodos chuvosos com elevadas temperaturas. Houve também, a dominância de clorofíceas da ordem Chlorococcales, que pode sugerir que os reservatórios, apesar de terem sido enquadrados como oligotróficos a mesotróficos, podem estar no processo de eutrofização. Porém, deve-se levar em conta também, a sua densidade, além de sua dominância. O grupo das clorofíceas ter apresentado maior riqueza em termos de número de taxa nos reservatórios, é fato comum na comunidade fitoplanctônica de lagos tropicais e subtropicais.

3.5- ALGUMAS ANÁLISES DE QUALIDADE DA ÁGUA EM FUNÇÃO DE VARIÁVEIS QUÍMICAS

Espíndola (2002) comparou o processo de eutrofização ocorrido no reservatório de Salto Grande (22°44'S e 47°15'W) e o iniciado no reservatório do Lobo (22°10'S e 47°57'W), tendo como principais parâmetros de referência o nitrogênio orgânico total (e suas formas inorgânicas), fósforo total e fósforo total dissolvido na água em escala temporal.

Em um período de quatro anos (1996-2000), o reservatório de Salto Grande apresentou incremento de concentração de nitrogênio orgânico de 6,78 mg L⁻¹ para 9,11 mg L⁻¹, para o reservatório do Lobo a variação no período de onze (11) anos (1989-1999) foi de 0,34 mg L⁻¹ para 1,22 mg L⁻¹. Lobo apresentou gradiente crescente de variação, porém a uma taxa/ano bem menor que o reservatório de Salto Grande (ESPÍNDOLA, 2002).

Para fósforo total, em ambos os reservatórios, o comportamento foi semelhante quanto ao gradiente crescente de variação, porém as taxas de incremento ano foram bem maiores para o reservatório do Lobo (Salto Grande variou de 202,95 µg L⁻¹ para 215 µg L⁻¹ de 1996 a 2000, já Lobo variou de 19,56 µg L⁻¹ para 81,24 µg L⁻¹ no período de 1989 a 1999). Verificou-se para os dois reservatórios gradientes crescentes na concentração de fosfato total dissolvido na água, também como para nitrato, amônia e nitrito (ESPÍNDOLA, 2002).

Esta análise comparativa, de um reservatório eutrofizado com um em processo inicial de eutrofização, reforça a utilização da concentração de nutrientes como indicadores de nível trófico de reservatórios (apresentam diferenças em escala temporal e na ordem de grandeza das concentrações dos nutrientes estudados) (ESPÍNDOLA, 2002).

3.6- ANÁLISES DE ALGUMAS MODELAGENS IMPLEMENTADAS POR DIFERENTES PESQUISADORES

O uso de abordagens objetivas e generalistas, no gerenciamento ambiental, é um das questões que dá suporte à necessidade de melhores indicadores de saúde ambiental, os quais possibilitam estrutura racional de tomada de decisão na área das ciências ambientais. Hakanson (2003) apresenta a utilização de um índice ambiental (um medida agregada), em detrimento à utilização de única variável ambiental. Desta forma, ter-se-ia uma visão mais generalista, onde o estudo se daria por tipo de ecossistemas, em detrimento a um único ecossistema (PER, denominado risco potencial de ecossistemas). Hakanson (2003) apresenta relação das maiores ameaças ambientais à vida no planeta terra, dentre elas a eutrofização, onde os elementos químicos envolvidos são fósforo e nitrogênio.

Algumas relações e análises apresentadas por Tufford (1999), em lagos relativamente rasos, a água está em constante movimento, por conseguinte a estratificação térmica é transitória ou, praticamente, não acontece em grande parte do ano. O acúmulo de sedimentos reduz a profundidade da água, criando assim habitat adicional para macrófitas. A concentração de nutrientes e os índices de estado trófico tendem a ser maiores e, a produtividade primária é menor acima e abaixo do reservatório, o que embasam a conclusão de que a claridade da água (Secchi) é função da turgidez de ausência de algas. Neste estudo, foram utilizados para o modelo hidrodinâmico intervalos de tempo de 120 segundos e modelo de qualidade da água de 2 horas, simulados para um intervalo de 365 dias.

Tufford (1999) apresenta algumas conclusões sobre eutrofização e sua modelagem, a produção primária é modificada pela luz e limitação de nutrientes.

A produção primária em reservatórios tropicais²⁵ é controlada, além da morfometria, por variáveis climáticas determinantes da estrutura térmica e dos padrões de circulação de

²⁵ Teoricamente lagos contidos entre os trópicos de Câncer e Capricórnio podem ser considerados tropicais. Lagos equatoriais poderiam ser considerados como uma categoria à

água. A ação de alguns destes fatores, pode ser intensificado pelo grau de trofia do sistema. O grau de trofia dos reservatórios diferencia em relação aos meses de coleta, o que evidencia o efeito do aporte de nutrientes que entra no sistema de forma difusa em função da incidência de chuvas, além do efeito da temperatura na produtividade primária (CALIJURI, 2003; PEREIRA, 2003).

Em reservatórios zooplâncton e fitoplâncton estão sujeitos a mudanças contínuas ou a freqüentes distúrbios, (Hipótese do Distúrbio Intermediário), os quais dependendo da escala temporal poderão contribuir para a manutenção de maior diversidade. Apesar das diferenças existentes entre lagos naturais e artificiais, as relações entre grau de trofia e diversidade, algumas espécies ainda são consideradas como representantes de um sistema oligotrófico ou eutrófico. Em reservatório mesotrófico, os nutrientes dissolvidos (nitrato e fosfato conjuntamente) são determinantes da produção primária fitoplanctônica. Para reservatórios hipereutrófico, essa produção é determinada pelo fosfato, transparência e estabilidade física da coluna de água (CALIJURI, 2003; PEREIRA, 2003). Segundo Velho (2003), as dimensões dos reservatórios e a velocidade de água corrente (características hidrodinâmicas) são fatores importantes na determinação de padrões de distribuição espacial da abundância de protozoários em reservatórios.

A construção de reservatórios causa alterações na comunidade de peixes, devido a profundas modificações nos recursos alimentares disponíveis aos peixes, aumentando a abundância de alguns recursos e reduzindo a de outros. Segundo Pereira (2002), a maioria das espécies encontradas nos reservatórios do médio e baixo Tietê foi considerada como generalista e, muitas espécies que se comportam como generalistas nos reservatórios são especialistas nos tributários, o que é fortalecido pela ausência de espécies onívoras nos tributários. Pereira (2002) conclui que em reservatórios as espécies mais favorecidas são as generalistas, ou aquelas que conseguem explorar recursos autóctones, como insetos aquáticos, detritos, crustáceos, peixes e algas. Espécies generalistas são aquelas que se alimentam de inúmeros recursos, que apresentam variação temporal e espacial, como insetos e gramíneas. Ocorre uma generalização da dieta das espécies de peixes nos reservatórios se comparada com tributários, há uma redução da incidência de espécies piscívoras na comunidade de peixes em reservatórios, sendo observado o hábito onívoro. Nos tributários, há maior disponibilidade de recursos, possibilitando às espécies escolher os recursos preferenciais. A disposição dos reservatórios em cascata, acarreta diferenças no tipo e a quantidade de recursos a serem

parte dentre os lagos tropicais, uma vez que se encontra em uma zona especial em relação ao restante dos trópicos.

utilizados pelas espécies de peixes. Trabalhos que abordam a dieta e a atividade alimentar fornecem subsídios para compreender o funcionamento trófico de uma comunidade. Fitoplâncton e zooplâncton são itens secundários na alimentação de peixes adultos.

Apesar da crença que flutuações do nível de água exercem influência na qualidade da água, condicionando seu uso, existem poucos estudos direcionados ao entendimento do mecanismo através dos quais os padrões hidrológicos podem influenciar a dinâmica de reservatórios. A discussão na literatura científica foca amplamente nos efeitos do processo de enchimento de novos reservatórios ou dos efeitos de reenchimento de reservatórios, que foram completamente esvaziados pra reparos. Estudos que focam o efeito flutuações periódicas, do nível de água de reservatórios, são escassos. Existe escassez de informações básicas, necessárias para o gerenciamento efetivo de reservatórios sujeitos às flutuações periódicas do nível de água (GERALDES, 2005).

Algumas conseqüências dos distúrbios causados por flutuações extremas de nível de água e onde o reenchimento é realizado após um curto período, é a exposição de sedimentos nos ciclos de seca e chuva, que podem ter implicações no ciclo de nutrientes (principalmente disponibilidade de fósforo, P). Sedimentos expostos, periodicamente durante ciclos de seca e chuva, apresentam menor capacidade de absorver nutrientes do que aqueles que permanecem inundados. De acordo com Geraldes (2005), sedimentos que eram periodicamente expostos em reservatório português liberavam maiores quantidades de SRP (fósforo solúvel reativo), do que os que permaneciam completamente inundados, e ainda que, o uso intenso da água acentua as flutuações do nível de água, contribuindo para o aumento de nutrientes e a concentração de matéria orgânica.

Existe escassez de histórico de dados, que relacionam variações ambientais e sua influência na dinâmica da comunidade biótica. Existe então necessidade de preenchimento desta lacuna. É importante entender a extensão que mudanças na dinâmica do reservatório (principalmente nos componentes bióticos) são induzidas por flutuações da água e/ou fatores sazonais, que agem independentemente da flutuação do nível de água. Tais informações são fundamentais para o desenvolvimento de modelos preditivos de qualidade de água, adaptados a uma região em particular, particularmente aqueles necessários para promover o desenvolvimento e implementação de práticas de gerenciamento apropriado para uso múltiplo de reservatórios (GERALDES, 2005).

A opção mais barata para melhoria da qualidade da água envolve regulação hidráulica, que engloba a escolha da melhor hora e profundidade para saída de água. Para isso, o reservatório deve possuir estrutura de comportas para liberação de água, espaçada

verticalmente em intervalos de 5 metros (STRASKRABA, 1993). A qualidade da água liberada é diretamente relacionada à distribuição vertical e horizontal da água, de boa qualidade do reservatório e da flexibilidade da operação das comportas. A qualidade da água liberada modifica de acordo com qualidade da água da camada liberada e, da qualidade da água que entra no sistema, o que seria uma forma de otimizar a saída de água e minimizar os danos causados a jusante. Esta opção será possível, desde que, haja monitoramento das variáveis de qualidade (perfil de temperatura, oxigênio dissolvido e transparência da água versus profundidade) ou modelo hidrodinâmico estratificado do reservatório. Esta opção não seria facilmente aplicada em hidrelétricas em função da não existência de uma estrutura de comportas com alturas diferentes entre si.

No caso de reservatórios para geração de energia, as hidroturbinas captam a água com baixo oxigênio e a liberam à jusante, criando problemas de baixo oxigênio imediatamente abaixo da barragem. Através de monitoramento, esse problema é minimizado, utilizando-se inserção de equipamentos de aeração ou ajuste de fluxo de água.

Espíndola (2002 b) constata em estudo limnológico dos reservatórios em cascata do médio e baixo Tietê, a diferenciação temporal, provavelmente, em decorrência das características climáticas e de sazonalidade das culturas desenvolvidas na região, e também, variação espacial, com tendência à melhoria da qualidade da água em direção aos últimos reservatórios, a qual será relacionada à retenção de poluentes e nutrientes no início do sistema (acima de 70% de retenção), principalmente pelo represamento do rio Tietê, com as construções de Barra Bonita e Bariri.

Uma importante condição para análise de impactos na qualidade da água nos recursos hídricos é a posição do reservatório em um rio contínuo ou em cascata. Deve-se considerar o efeito que a descarga do reservatório a montante tem na qualidade de água do reservatório a jusante. Teoricamente, esses sistemas apresentam melhoria da qualidade da água cascata abaixo, visto que parte dos nutrientes e poluentes fica retida no início do sistema. Além disso, características intrínsecas de cada reservatório, como vazão, tempo de retenção e volume, também interferem nas características limnológicas (ESPÍNDOLA, 2002 b).

Elevados valores de clorofila-a podem ser explicados, além da elevada concentração de nutrientes, pela elevada transparência da água. Em período de seca, quanto maior a transparência, maior é a penetração de luz no campo subaquático, o que estimula a produtividade do sistema. Com a diminuição das chuvas, a tendência normal em relação à operação da barragem é reduzir a vazão, o que conseqüentemente propicia o aumento, no tempo, de retenção da água nos reservatórios, favorecendo ainda aumento da produtividade.

Ausência de chuva e pouco vento levam à sedimentação do material suspenso na coluna d'água. Reduções na temperatura, no período seco, podem causar diminuição da clorofila em função de alterações metabólicas (ESPÍNDOLA, 2002 b).

Normalmente, períodos chuvosos estão associados à diminuição da transparência, em função de concentrações mais elevadas de material em suspensão, provavelmente devido à entrada de material orgânico e inorgânico nos corpos d'água. Em períodos de baixa transparência, há tendência de diminuição da clorofila a, devido à dificuldade da luz em atingir pequenas profundidades, que associados ao aumento da vazão, prejudicam a reprodução de organismos clorofilados do sistema (ESPÍNDOLA, 2002 b).

Bicudo (1999) relata que pesquisadores como Lewis, acreditam que parece haver grande grau de repetição na sazonalidade do período de mistura de lago tropical, e que lagos tropicais de média e alta profundidade, freqüentemente, apresentam estratificação durante uma estação completa do ano.

Bicudo (1999) constatou em estudos no Lago das Garças, que a sazonalidade desse reservatório não é dirigida pela periodicidade de chuva, como foi apontado para outros reservatórios de maior porte, a separação em três épocas do ano (setembro a janeiro, fevereiro-março, abril a agosto) melhorou a representatividade das características limnológicas.

No modelo utilizado por Garnier et al. (2005), verificou-se que a floração de fitoplâncton pode se prevista de ocorrer, tão logo a defluência atinja o nível de que o crescimento do fitoplâncton é maior que a taxa de diluição. Em anos hidrológicos de seca, a máxima biomassa fitoplanctônica é observada em Abril, porém em anos de chuva ela se apresenta em Maio ou Junho. A amplitude também é função da defluência, ela é menos pronunciada para no período de elevadas defluências. Verificou-se também, a concentração de fosfato maior no verão do que no inverno, que mostra a importância de fontes pontuais, que são diluídas no inverno pelo maior fluxo de água, o que evidencia importância de análises que separem períodos de seca e chuva. Concentrações de fosfato são maiores, próximos a áreas com maior densidade populacional, e, maior domínio de indústrias e áreas de plantio. A crescente concentração de fósforo no solo agriculturável, constitui ameaça de longo prazo para a qualidade da água, visto que o fósforo particulado do solo é transferido diretamente para a superfície da água, através da erosão e dissolvida na coluna d'água.

Geraldes (2005) realizou seus estudos para o seguinte regime: fase de nível máximo (Janeiro à Junho); fase de esvaziamento (de meio de Junho à começo de Setembro) e nível mínimo (de meio de Setembro à começo das primeiras chuvas). Ele trabalhou com as médias

das variáveis. As médias de fósforo total, concentração de clorofila foram mais altas durante o nível mínimo e decresceram durante a fase de nível máximo (eram altas no começo da fase e depois decresciam). O autor utilizou valores médios, porém fez uma avaliação dos valores máximos e mínimos, para cada um dos anos estudados para ver o comportamento do fósforo total.

Tuzun (2006) verificou que, flutuações de concentração de fósforo total seguem padrão sazonal, com valores menores durante o verão e valores de pico durante a estação chuvosa. Durante seus estudos, a maior concentração média evidenciou-se entre as profundidades de 5 e 10 metros devido a entrada de água, isso para lagos profundos estratificados. Em 15 metros de profundidade, o fluxo de água teve efeito de redução na concentração de fósforo.

3.7- DIVERSIDADE DE ZOOPLÂNCTON

A composição e a diversidade de zooplâncton de reservatórios são controladas pelos seguintes fatores: tempo de retenção da água, predação, eutrofização, entrada de pesticidas e de herbicidas das bacias hidrográficas.

Uma das principais causas da alteração da biodiversidade em sistemas de água doce, a longo prazo, provavelmente seriam as mudanças climáticas. Entretanto, em escalas locais e regionais, a maioria dos impactos provê do uso da água e dos ecossistemas aquáticos pelo homem. As espécies aquáticas são especialmente vulneráveis as mudanças que resultam de atividades humanas, pois muitas são endêmicas, adaptadas a determinadas localidades e não podendo se dispersar para áreas não perturbadas, as quais podem acabar se extinguindo.

A fragmentação de habitat, incluindo a construção de barragens e canalização de rios provoca a perda de habitat natural de organismos, que muitas vezes não encontrando o novo nicho acaba se extinguindo. A construção de reservatório causa mudança na composição taxonômica, reduzindo à jusante a diversidade de espécies, quando comparada com a dos rios naturais, a formação de um lago favorece o desenvolvimento de organismos planctônicos. A composição específica, tanto de fitoplâncton, como de zooplâncton depende dos organismos pioneiros que irão colonizar o sistema lacustre.

A composição zooplancônica, de um lago artificial (represas), difere da composição de lagos naturais, fundamentalmente na abundância relativa dos principais grupos componentes. O funcionamento hidrodinâmico dos reservatórios, com características de instabilidade,

favorece maior desenvolvimento de espécies *r* estrategistas, que no caso dos organismos zooplancônicos seriam os rotíferos.

A construção de reservatórios para fins de geração de energia elétrica, normalmente envolve extensas áreas de inundação, e, quando isto ocorre, por exemplo, em uma floresta tropical úmida como a região amazônica, o material inundado sofre rápido processo de decomposição, criando condições anóxicas nas primeiras camadas da superfície. Devido à rica matéria orgânica e detritos existentes, certas espécies zooplancônicas, adaptadas às condições de baixas concentrações de oxigênio, se desenvolvem em grande abundância.

A eutrofização de lagos e rios constitui resposta dos sistemas aquáticos ao aumento da entrada de nutrientes. O enriquecimento natural, provoca o aumento da produtividade dos sistemas aquáticos, em todos os níveis tróficos sendo um fator benéfico, quando o aumento de nutrientes é controlado. A composição planctônica sofre alterações, com o processo de eutrofização, e, espécies que são ausentes em sistemas oligotróficos são encontradas em sistemas eutróficos, servindo de indicadores do estado trófico das águas. Mudanças na composição zooplancônica, relacionando com a eutrofização do sistema, são contestadas por muitos autores que defendem a teoria da predação, e, seleção do zooplâncton de porte maior pelos peixes planctívoros ou por outros peixes nas suas fases de alevino. A composição zooplancônica pode mudar com o enriquecimento, porém uma mudança rápida é sentida mais na relação predador-presa, do que devido aos nutrientes ou as condições do fitoplâncton (HENRY, 1999).

Os organismos aquáticos, principalmente planctônicos em reservatórios e bentônicos em rios são os que melhor respondem as mudanças das condições ambientais. Ambientes fortemente impactados mostram poucas espécies que, se estiverem bem adaptadas, podem exibir ótimo desenvolvimento.

Capítulo 4

Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos

A partir de 1950, devido à aceleração da industrialização, surgiu a necessidade da expansão do parque gerador de energia elétrica. Devido à alta disponibilidade do potencial elétrico optou-se por desenvolver a hidroeletricidade. Com isso, deu-se início a construção de várias usinas de grande porte e origem ao sistema interligado nacional.

No sistema brasileiro, a produção de hidroeletricidade é complementada com a geração termoeétrica. A fonte de energia mais expressiva no Brasil é a hidrelétrica, que corresponde a 77,1% da oferta de energia no ano de 2005; 2,2% de nuclear; 3,9% de renováveis; 8,3% de importação e o restante complementado pelas termoeletricas, com diferentes fontes primárias, por exemplo, carvão, bagaço de cana, combustível fóssil, entre outros (dados ANEEL 2006). O principal objetivo dos profissionais das mais variadas áreas é maximizar a produção de energia paralelamente à redução dos danos ambientais.

Passou-se a objetivar a manutenção das plantas existentes, maximizando a sua produtividade e minimizando os danos ambientais. São ações conflitantes que compõe as restrições dos estudos de planejamento da operação do sistema interligado nacional.

Devido às características particulares do parque gerador brasileiro, o planejamento da operação é tarefa complexa que objetiva determinar uma estratégia que minimize o custo da operação das unidades do sistema durante o horizonte de planejamento. A estratégia deve garantir a confiabilidade do sistema, e atendimento à demanda de forma a minimizar os custos da complementação termoeétrica, o que abrange a otimização plurianual dos reservatórios até o despacho horário das usinas, levando em conta as restrições operativas e ambientais.

O sistema brasileiro é composto de grandes bacias interligadas e com reservatórios de capacidade de regularização plurianual, existe dependência entre as decisões tomadas ao longo do horizonte de planejamento. A energia hidráulica disponível é limitada, uma decisão tomada no presente deve garantir menor complementação termelétrica no presente e assegurar o não comprometimento da geração futura. O sistema é dinâmico com dependência temporal, presente é função do passado e afeta o futuro. A figura 4.1 ilustra o processo de tomada de decisão em sistemas hidrotérmicos.

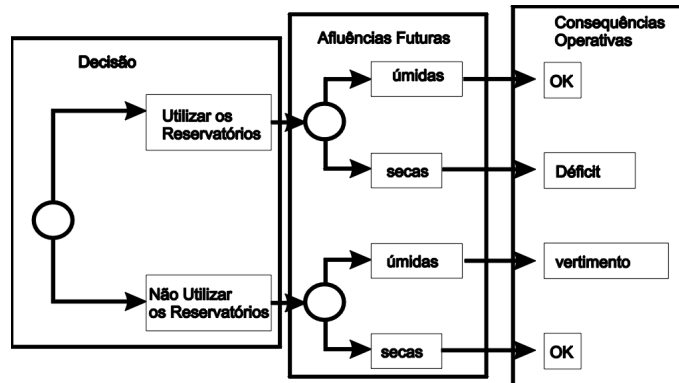


Figura 4.1- Processo de tomada de decisão em sistemas hidrotérmicos.

4.1- MODELAGEM PARA GERENCIAMENTO DE RESERVATÓRIOS

Modelos ecológicos são fundamentais para o entendimento e gerenciamento ambiental. O entendimento é necessário para prover a base de dados (informações) para tomada de decisões políticas e de gerenciamento a serem realizadas como resposta às condições observadas e/ou esperadas. Resultados ecológicos podem ter implicações de gerenciamento e vice-versa.

Os modelos utilizados para gerenciamento podem ser classificados como: (STRASKRABA, 1993)

- Modelos descritivos: não calculam as opções de gerenciamento diretamente para dada situação. Por meio da análise de cenários, simulando a resposta para diferentes opções de gerenciamento, indicam as possibilidades de gerenciamento adequadas.
- Modelos de gerenciamento ou de otimização: Incorporam uma série de procedimentos para a escolha da opção mais adequada, de acordo com um conjunto de critérios apropriados para a situação.
- Sistemas Inteligentes: Utilizam expressões qualitativas e quantitativas que guiam o usuário às respostas para questões complexas. Consiste de uma

base de regras e uma base de dados, estabelecida a partir do conhecimento dos profissionais da área.

- Sistema de suporte a decisão: Trabalham paralelamente com sistemas inteligentes e modelos empíricos e de simulação.

O gerenciamento dos reservatórios deve basear-se na aplicação da teoria de ecossistemas, e na experiência prática da sua manipulação de acordo com os usos planejados, tais como, quantidade de água reservada, grau de interação com a bacia hidrográfica, flutuação do nível de água, tempo de residência (ou tempo de retenção). A obtenção de informação científica integrada sobre represas deve considerar a interação e a covariância entre componentes abióticos e bióticos. É fundamental levar-se em conta as mudanças temporais que ocorrem, bem como as escalas espaciais ao longo dos principais eixos das represas.

Os principais componentes e função de força que estabelecem as condições de contorno no funcionamento do reservatório e cujas medidas essenciais são: características climatológicas da região, ciclo hidrológico, o tempo de residência e a posição do reservatório (uma vez que há efeitos a montante e a jusante de um reservatório sobre o outro, visto que barragens em cascata é uma característica de países com grandes dimensões e rios extensos). O funcionamento do reservatório adaptado às características de construção, modifica as interações existentes, o que lhe dá uma dinâmica temporal e espacial muito peculiar.

Outra condição de contorno essencial para o conhecimento científico e aplicação são as características técnicas de construção das represas, tais como altura da barragem, altura da tomada d'água para as turbinas, número, posição dos vertedouros, profundidade máxima na barragem.

O passo mais importante na formulação do modelo de gerenciamento é a determinação de uma função objetivo e as variáveis envolvidas. No gerenciamento de qualidade de água a função objetivo mais comum consiste da minimização de custos para manutenção de dada condição de qualidade da água. A qualidade da água é caracterizada pelos níveis de algumas variáveis tais como, oxigênio dissolvido e de biomassa de algas (STRASKRABA, 1993). A variável básica é definida pelo modelo utilizado, as demais se devem aos limites físicos e a capacidade das diferentes opções de gerenciamento.

A questão a considerar é, então, se as variações das características limnológicas nas escalas temporal anual e espacial são recorrentes, ou seja, se existem padrões de variação no sistema. Uma tentativa de descobrir padrões que possam ser quantificados no sistema e comparados entre sistemas. O entendimento de padrões e dos processos que os produzem também é fundamental para o desenvolvimento de princípios de manejo e elaboração de modelos preditivos.

Os modelos matemáticos devem combinar a quantidade de água e a qualidade de água dos sistemas. As conclusões dos modelos devem ser usadas com cautela, levando em consideração as limitações dos modelos, possíveis inadequações da formulação e base de dados de entrada incompletos.

4.2- PROBLEMA DO PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO

O problema do planejamento da geração de sistemas é um problema de grande porte em função do número de reservatórios e de termoeletricas, e da característica de regularização plurianual do sistema brasileiro que implica na adoção de longos períodos de estudo para o planejamento. É um problema de caráter estocástico, a incógnita de variáveis tais como a afluência futura, função das condições climáticas e do mercado a ser atendido (demanda).

O problema da operação de reservatórios é um processo de tomada de decisão sob incerteza, onde o operador do sistema deve utilizar ferramentas adequadas de análise estatística para orientá-lo nesse processo.

Para uma mesma bacia hidrográfica existe uma interdependência entre usinas que deve ser respeitada. Devem ser levadas em conta restrições para demais usos da água, tais como navegação, irrigação, controle de cheias e saneamento. Há ganho econômico com o uso múltiplo do reservatório. Os usos múltiplos dependem de complexas interações e de um gerenciamento adequado, o que por sua vez poderá ser realizado se ocorrer um acompanhamento dos padrões de complexidade do sistema e de suas permanentes alterações como o resultado das ações antrópicas na bacia hidrográfica (HENRY, 1999).

As funções que descrevem a geração hidráulica são funções não lineares. O problema do planejamento da operação é um problema de otimização dinâmico, de grande porte, estocástico, interconectado e não linear.

Em função da complexidade do problema sugere-se então a decomposição temporal e utilização de modelos com diferentes horizontes de planejamento e graus de detalhamento do sistema.

No planejamento de curto prazo, cujo horizonte é de algumas horas a uma semana, o objetivo é a desagregação de metas de geração semanais ou mensais previamente estabelecidas, considerando todos os aspectos energéticos, hidráulico e elétrico não levados em conta nas etapas de planejamento com horizontes mais amplos. Como o horizonte de otimização é pequeno, afluições e demandas são consideradas conhecidas.

Planejamento de médio prazo abrange um horizonte de alguns meses com discretização mensal ou semanal. O problema ainda é tratado como determinístico cujo objetivo é a determinação de uma política de geração individualizada, considerando o acoplamento hidráulico e possível diversidade hidrológica entre rios.

As afluições e demandas utilizadas no modelo podem ser obtidas por modelos de previsão. As soluções do planejamento de médio prazo são as metas de geração mensais ou semanais de cada uma das usinas do sistema que serão os dados do planejamento de curto prazo.

O planejamento de longo prazo abrange o horizonte de alguns anos com discretização mensal, para sistemas constituídos de grandes reservatórios e com grande capacidade de regularização. O grau de incerteza das afluições é alto, o problema pode ser resolvido por algoritmos de programação Dinâmica Estocástica. A solução é a curva de custo esperado futuro de operação, associado ao armazenamento do sistema no início do horizonte de longo prazo.

A solução do problema de planejamento de longo prazo por programação dinâmica estocástica apresenta limitação quanto ao número de variáveis de estado envolvidas no problema, ou seja, o elevado número de combinações das variáveis de estado praticamente inviabiliza a solução do problema em termos de tempo de processamento. Para contornar esse problema são utilizadas técnicas para transformar um problema de grande escala, com grande número de variáveis, em uma série de problemas menores com menos variáveis. Uma dessas técnicas constitui na metodologia de agregação de um sistema de múltiplos reservatórios em um sistema equivalente que recebe, armazena e deflui energia e a sua otimização por programação estocástica.

Na maioria dos métodos utilizados para solução do problema de planejamento de longo prazo a solução é feita por programação dinâmica estocástica.

4.3- MODELO EQUIVALENTE

A modelagem compreende o detalhamento do sistema hidrotérmico de geração com a modelagem de usinas hidroelétricas e termoeletricas considerando todas suas características e restrições de operação, a agregação do sistema em modelo equivalente que reduz as variáveis de estado do problema, permite sua resolução sem desconsiderar a estocasticidade do mesmo, a ser resolvido por programação dinâmica estocástica aplicado a modelagem das vazões afluentes ao sistema. A figura 4.2 apresenta as variáveis representadas na modelagem de uma cascata.

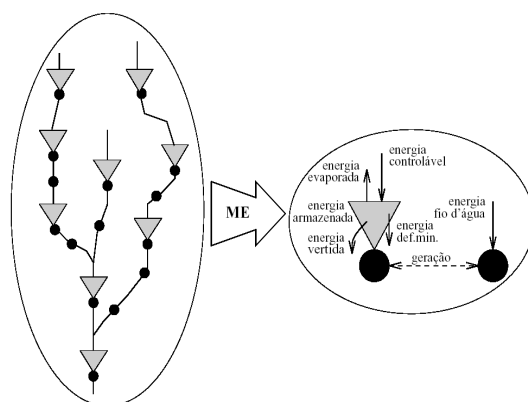


Figura 4.2 – Variáveis representadas na modelagem de uma cascata

4.3.1- SISTEMAS HIDROTÉRMICOS DE GERAÇÃO

O sistema hidrotérmico é composto de: geração, transmissão, distribuição e cargas e/ou consumidores.

A geração engloba as unidades responsáveis pela produção de energia quer sejam hidrelétricas ou termoeletricas. A transmissão compreende as estruturas e cabos responsáveis pelo transporte dessa energia a níveis de tensão mais elevados até os pontos de distribuição ou pontos de entrega de consumidores. A distribuição desempenha papel semelhante ao da

transmissão, porém em níveis de tensão mais baixos e têm em sua extremidade os consumidores.

O parque gerador brasileiro engloba 116 usinas hidrelétricas em operação com mais de 30 MW, que somam cerca de 71.000 MW de potência instalada e cerca de 47 usinas termelétricas, correspondendo a 14.4000 MW de potência instalada (ANEEL, 2006).

A- Usinas Hidrelétricas

A energia potencial hidráulica é uma das formas de energia renovável mais abundante na natureza. O Brasil é privilegiado neste aspecto, pois possui grandes bacias hidrográficas e grande quantidade de recursos a ser explorado. A interligação dessas usinas é realizada por meio de extensa rede de transmissão, o que possibilita a otimização da produção de energia em função da diversidade hidrológica existente entre as bacias hidrográficas.

O plano decenal 2006-2015 da ANEEL aponta para um aumento de aproximadamente 31.000 MW na capacidade de geração hidrelétrica instalada, com a implantação de 83 novas usinas hidrelétricas neste período, acompanhadas pela expansão do sistema de distribuição em cerca de 41.337 km (ANEEL, 2006). Segundo a ANEEL existe tendência de maior número de usinas a fio d'água a serem instaladas do que de acumulação.

A tabela 4.1 lista a evolução da distribuição das hidrelétricas nas regiões hidrográficas (fonte ANEEL 2006).

Tabela 4.1 - Evolução da distribuição das usinas hidrelétricas nas regiões hidrográficas.

Região Hidrográfica	Existente		Planejado		Total	
	UHE Operação	Potência Instalada (MW)	UHE Planejada	Potência Instalada (MW)	UHEs	Potência Instalada (MW)
Amazônica	5	710	8	12.494	13	13.204
Atlântico Norte	-	-	-	-	-	-
Tocantins- Araguaia	5	10.780	14	7.021	19	17.961
Parnaíba	1	225	5	612	6	837
São Francisco	8	10.475	3	642	11	11.117
Atlântico Leste	3	1529	2	480	7	2.009
Atlântico Sudeste	23	2401	9	913	32	3.253
Paraná	52	40.222	29	4.848	81	45.070
Paraguai	6	747	-	-	6	747
Atlântico Sul	7	1.121	4	477	11	1.598
Uruguai	4	2.930	9	3.476	13	6.406
Total	114	71.140	83	30.963	199	102.202

Fonte: ANEEL 2006

O processo de geração de energia hidrelétrica baseia-se na conversão da energia potencial hidráulica, gerada pela diferença de altura, em energia elétrica. Há o armazenamento da água dos rios nos reservatórios, cuja função é a de criar diferença de alturas que provocam o acúmulo de energia potencial hidráulica. A água do reservatório é liberada através de tubulações que conectam o reservatório ao caracol que conduzirá a mesma para girar as pás das turbinas, nas quais a energia de pressão dinâmica é convertida em energia cinética de rotação. As turbinas estão conectadas a geradores, os quais são colocados em movimento contínuo, convertendo energia cinética em energia elétrica.

A figura 4.3 apresenta o esquema de uma usina hidrelétrica.

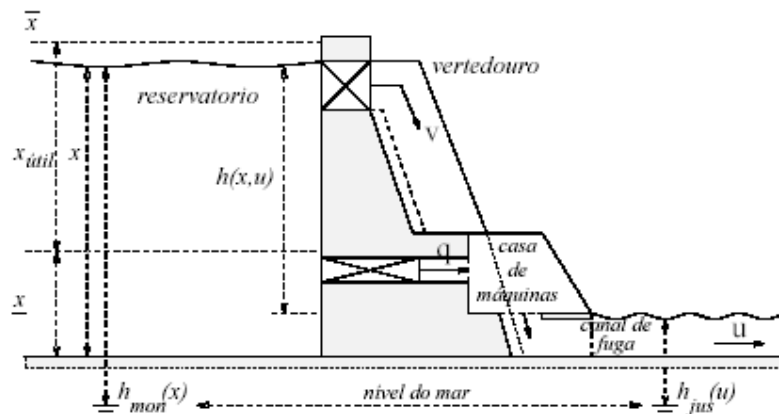


Figura 4.3- Esquema de uma usina hidrelétrica

Onde:

x - volume do reservatório [hm^3];

$x_{\text{útil}} = \left(\bar{x} - x_{-} \right)$ - volume útil do reservatório [hm^3];

x_{-} - volume mínimo do reservatório [hm^3];

$\bar{x}$ - volume máximo do reservatório [hm^3];

u - defluência [m^3/s];

q - engolimento [m^3/s];

v - vertimento [m^3/s];

$h_{\text{mon}}(x)$ - nível do reservatório [m];

$h_{\text{jus}}(u)$ - nível do canal de fuga [m];

$h(x,u) = h_{\text{mon}}(x) - h_{\text{jus}}(u)$ - altura de queda bruta [m];

pc - perda de carga nas tubulações [m];

$h_{\text{liq}}(x,u) = h_{\text{mon}}(x) - h_{\text{jus}}(u) - pc$ - altura de queda líquida [m].

B- Usinas Termoelétricas

No Brasil a energia termoelétrica corresponde a uma parcela pequena da produção de energia e entra de forma a complementar a energia necessária para atendimento da demanda.

Neste tipo de usina a geração da energia elétrica se dá pela transformação da energia térmica em mecânica para a movimentação de uma turbina acoplada a um gerador. Existem diferentes tipos de usinas térmicas em função do tipo de combustível utilizado e a forma como ele é queimado. Elas se dividem em dois grupos principais em função do tipo de combustível:

- usinas convencionais utilizam de combustíveis fósseis como carvão, óleo, gás natural, biomassa e madeira;
- usinas nucleares que utilizam combustíveis físséis.

Em função de como esse combustível é queimado elas se dividem em:

- turbinas a vapor: o combustível é queimado, fornece calor a uma caldeira, na qual a água é aquecida e transformada em vapor, que sob pressão movimenta a turbina;
- turbinas a gás: a turbina é movida por uma mistura gasosa de ar comprimido com gás obtido na queima de combustível;
- combustão direta: o combustível alimenta um motor a pistão, (por exemplo: motor diesel) ligado diretamente ao gerador elétrico. São as usinas mais versáteis, de menores dimensões, apresentam facilidade de operação, rapidez no aumento ou redução de carga, porém utilizam o combustível mais caro e mais poluente;
- ciclo combinado: há uma composição dos tipos anteriores.

Quanto à expansão de geração termelétrica no Brasil, dos 7.6000 MW previstos para entrar em operação no período 2006-2015, somente 54% são provenientes de combustíveis fósseis (gás natural, carvão, óleo combustível e diesel), sendo os 46% restantes oriundos de geração nuclear (17%) e de biomassa (29%) (ANEEL, 2006).

Quanto ao modelo da termelétrica a entrada é o custo total da operação e a saída é a geração elétrica. A modelagem é função dos custos operacionais e da eficiência da unidade, que envolve a eficiência da caldeira e do conjunto turbina-gerador. O custo total de operação inclui o custo do combustível, custos de mão de obra, estoques e manutenção os quais são assumidos como fixos.

O custo total é modelado como função convexa e crescente da geração térmica, aproximado de um polinômio do segundo grau, baseando-se na curva da taxa térmica incremental da usina, que é a relação (MJ/MVA) da usina.

4.4- FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA

O objetivo principal do planejamento da operação energética é a minimização dos custos de operação de um sistema hidrotérmico ao longo de determinado horizonte. A formulação determinística para o problema considerando as vazões afluentes e a demanda conhecidas, está mostrada abaixo, adotando-se uma discretização mensal.

$$\min_{p_j^t} \sum_{t=0}^{T-1} \left[\frac{1}{(1+\beta)^t} \Psi^t(D^t - P^t) \right] + \frac{1}{(1+\beta)^T} V(x^T) \quad (4.1)$$

Sujeito a

$$\sum_{i=1}^I g_i^t + \sum_{j=1}^J p_j^t = D^t \quad (4.2)$$

$$g_i^t \leq g_i^t \leq \bar{g}_i^t \quad (4.3)$$

$$p_j^t = k_j \cdot (h_{mon}(x_j^t) - h_{jus}(u_j^t) - pc) q_j^t \quad (4.4)$$

$$x_j^{t+1} = x_j^t + \left[y_j^t + \sum_{k \in \Omega_j} u_k^t - u_j^t \right] \Delta t \quad (4.5)$$

$$u_j^t = q_j^t + v_j^t \quad (4.6)$$

$$\underline{x}_j^t \leq x_j^t \leq \bar{x}_j^t \quad (4.7)$$

$$\underline{u}_j^t \leq u_j^t \leq \bar{u}_j^t \quad (4.8)$$

$$\underline{q}_j^t \leq q_j^t \leq \bar{q}_j^t(h_{liq}) \quad (4.9)$$

$$v_j^t \geq 0 \quad (4.10)$$

$$x_j^0 \text{ dado} \quad (4.11)$$

Onde:

T – número de intervalos de tempo [meses];

y_j^t - afluência incremental ao reservatório j no instante t [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$];

β - taxa de desconto do custo de operação futuro [%];

$\psi_i^t(g_i^t)$ - custo de operação da i ésima usina termoeletrica [R\$/ $\overline{MW}^{26}$]

$V(x^T)$ - custo associado ao estado final dos reservatórios do sistema [R\$]

g_j^t - geração da j ésima termoeletrica no período t [$\overline{MW}$];

$\underline{g}_j^t$ - geração mínima da j ésima termoeletrica no período t [$\overline{MW}$];

$\bar{g}_j^t$ - geração máxima da j ésima termoeletrica no período t [$\overline{MW}$];

I – número de termoeletricas no sistema;

J – número de hidrelétricas no sistema;

Ω_j - conjunto das usinas imediatamente à montante da usina j ;

D^t - mercado no período t [$\overline{MW}$];

Δt - tamanho médio do período t [s].

A distribuição da geração entre as diversas termoeletricas deve ser feita de forma a minimizar o custo da operação do parque termoeletrico, ou seja, deve-se encontrar

²⁶ Um $\overline{MW}$ é a energia correspondente a uma fonte de um MW de potência em dado período, mais especificamente um mês.

distribuição ótima de geração, sujeita as restrições, à demanda, aos limites de geração e volume, entre outras.

Existe um acoplamento entre o subproblema hidráulico e o subproblema térmico. A cada uma das partes interessa o valor agregado da outra.

A solução é realizada em duas etapas, primeiro é realizado a otimização da distribuição da geração térmica para todos os valores de geração do parque termoeletrico. O problema hidráulico é resolvido, depois da obtenção da curva ótima de operação do parque térmico, que é conhecido como despacho econômico termoeletrico.

4.5- DESPACHO ECONÔMICO TERMELÉTRICO

O objetivo do despacho econômico termoeletrico é o levantamento de uma curva de custo mínimo de operação de um sistema de usinas termoeletricas. O despacho deve encontrar a geração de cada uma das i -ésimas unidades do sistema g_i^t ($i=1,...,I$) no período t ($t=1,...,T$) para atender ao mercado G^t no mínimo custo.

O problema do despacho econômico termoeletrico pode ser formulado como sendo um problema de minimização de custos sujeito a uma restrição de atendimento de mercado.

$$\Psi(G) = \min_{g_i^t} \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^I \psi_i^t(g_i^t) \quad (4.12)$$

Sujeito a

$$\sum g_i^t = G^t \quad (4.13)$$

A função objetivo é crescente e convexa e as restrições são lineares e de igualdade. A política de geração econômica do sistema termoeletrico é distribuir a carga entre as unidades de geração de modo a igualar os custos marginais de geração.

A partir da solução térmica, o problema do planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos pode então ser modelado em função apenas de suas características hidráulicas, sendo que a distribuição ótima da complementação não hidráulica é resolvida pelo despacho econômico termoeletrico.

4.6- PROBLEMA HIDRÁULICO

Uma vez efetuado o despacho econômico termoeletrico, o problema pode então ser remodelado apenas em função de suas características hidráulicas.

O balanço hidráulico é obtido conforme a equação abaixo:

$$\min_{p_j^t} \sum_{t=0}^{T-1} \left[\frac{1}{(1+\beta)^t} \Psi^t(D^t - P^t) \right] + \frac{1}{(1+\beta)^T} V(x^T) \quad (4.14)$$

Sujeito a

$$P^t = \sum_{j=1}^J p_j^t \quad (4.15)$$

$$p_j^t = k_j \cdot (h_{mon}(x_j^t) - h_{jus}(u_j^t) - pc) q_j^t \quad (4.16)$$

$$x_j^{t+1} = x_j^t + \left[y_j^t + \sum_{k \in \Omega_j} u_k^t - u_j^t \right] \Delta t \quad (4.17)$$

$$u_j^t = q_j^t + v_j^t \quad (4.18)$$

$$\underline{x}_j^t \leq x_j^t \leq \bar{x}_j^t \quad (4.19)$$

$$\underline{u}_j^t \leq u_j^t \leq \bar{u}_j^t \quad (4.20)$$

$$\underline{q}_j^t \leq q_j^t \leq \bar{q}_j^t(h_{liq}) \quad (4.21)$$

$$v_j^t \geq 0 \quad (4.22)$$

$$x_j^0 \text{ dado} \quad (4.23)$$

A formulação considera o problema como determinístico, desprezando a estocasticidade de variáveis como vazões afluentes e mercado. Esta abordagem geralmente é utilizada em estudos de planejamento da operação das etapas de médio e curto prazos, onde o horizonte de planejamento permite que as variáveis aleatórias sejam consideradas conhecidas através de modelos de previsão.

4.7- MODELAGEM DE SISTEMAS DE RESERVATÓRIO

A modelagem matemática do planejamento da operação de reservatórios (POSH), pode ser feita a partir de modelos de simulação e de otimização. Nos modelos de simulação, os reservatórios seguem regras de operação pré-estabelecidas pelo usuário e os processos físicos representados pelas equações que o regem. Os modelos de otimização procuram a solução do problema de forma a atender aos objetivos estabelecidos para a operação do sistema.

Na simulação, o balanço hídrico nos reservatórios e as transferências entre eles são simulados pela equação da energia armazenada. As regras operativas, que produzem o melhor desempenho do sistema, devem ser obtidas a partir de um processo de tentativa e erro. Isso exige grande esforço de processamento e análise de diversas alternativas. Os modelos de simulação têm a vantagem de poder representar de forma mais fiel os aspectos físicos e operacionais que envolvem o problema.

No modelo de otimização define-se uma função objetivo, que é uma representação matemática dos objetivos a serem obtidos pela operação do sistema em análise. Busca-se minimizar ou maximizar essa função objetivo, cujas variáveis básicas são as chamadas

variáveis de decisão. Com a solução do problema, o conjunto das variáveis de decisão obtido é a solução ótima para a operação do sistema. Os processos físicos e condições de contorno do problema formam o conjunto das equações de restrição, tais como, limites de vazão defluente, limites de capacidade de reservatórios, limites da capacidade das turbinas, entre outros. As dificuldades associadas aos modelos de otimização estão relacionadas com o porte do problema, com as características da função objetivo, as equações de restrição e com a precisão requerida para solução do problema.

Existem diversas formas de se considerar usos múltiplos da água no problema de operação de reservatórios. Esses usos estão associados às variáveis de decisão, de estado ou a restrições. As variáveis de estado estão incluídas direta ou indiretamente na função objetivo. As restrições estão normalmente associadas às limitações impostas às variáveis de decisão ou de estado do sistema.

A modelagem de sistemas de reservatórios com usos múltiplos pode ser feita com base numa formulação que inclui na função objetivo apenas objetivos econômicos. A análise pode ainda incorporar objetivos de natureza ambiental ou social, onde se é possível estabelecer critérios numéricos para se tentar levar em conta tais objetivos, por exemplo, adoção de funções objetivo relacionadas à penalidades, valores, entre outros. Esse tipo de análise pode envolver múltiplos critérios para a avaliação do desempenho do sistema, que muitas vezes são baseados em aspectos subjetivos obedecendo determinada metodologia específica para a solução do problema.

Além da otimização com objetivos múltiplos, pode-se incorporar objetivos de natureza ambiental e social pela inclusão de restrições vinculadas às variáveis de decisão.

Para estudos de planejamento que envolvem usos como irrigação, geração hidrelétrica e outros usos associados ao armazenamento da água, o período de análise pode ser de várias décadas ou anos. O passo de cálculo, ou discretização, geralmente adotado é mensal. Pode-se ainda optar pelo passo de cálculo de alguns meses, que representem períodos secos e úmidos.

4.8- RESTRIÇÃO AMBIENTAL

O planejamento da operação da forma apresentada nos itens anteriores visa o atendimento somente das restrições de caráter construtivo e de operação do setor elétrico.

A relação do planejamento da operação e a qualidade da água e preservação ambiental no caso dos trechos a jusante do reservatório, está associada à manutenção de vazões mínimas

para garantia de diluição de poluentes, manutenção de volumes mínimos, níveis aceitáveis de oxigênio dissolvido, níveis aceitáveis de clorofila-a, e outros parâmetros físico-químicos regulamentados por norma. Podem ser impostas restrições à variação brusca dos níveis de água, restrições quanto aos níveis de água muito baixos ou muito elevados, evitando-se respectivamente baixas profundidades ou danos a ecossistemas ribeirinhos, entre outros.

O objetivo passa a ser a inclusão de restrição ambiental ao planejamento. Dentre as diferentes possíveis variáveis ambientais a serem utilizadas para essa análise, optou-se pela biomassa fitoplancônica representada pela clorofila-a. A análise foca o processo de eutrofização representado pela clorofila-a, variável que tem seu limite superior estabelecido por norma regulamentadora do CONAMA para diferentes classes de água.

A questão ambiental no planejamento da operação pode ser inserida de duas formas, na função objetivo ou nas restrições. Relacionando-se o volume útil do reservatório com o índice de clorofila-a obtido por monitoramento da qualidade da água, pode-se determinar um polinômio volume x clorofila-a característico do reservatório.

Como a qualidade da água é uma característica que expressa a sazonalidade das condições climáticas, o polinômio deverá expressar essa variação. Desta forma, a representação se dará por um polinômio para cada período, caracterizado pela precipitação, seca e chuva. Um único polinômio genérico para o reservatório perde em termos de expressividade na representação da qualidade da água, haja visto que a eutrofização é um processo de desenvolvimento da comunidade fitoplancônica que é função de temperatura, entrada de nutrientes, estratificação térmica da coluna d'água, entre outros. A precipitação é então fator determinante na variação da concentração desses elementos na coluna d'água. O objetivo é determinar um modelo, polinômio que descreva a relação de clorofila por volume útil de cada um dos reservatórios.

Uma opção é a inclusão e análise da resposta da variável clorofila em função da variação do volume do reservatório para cada intervalo de análise do planejamento. Porém, por ser um processo iterativo e demorado, se forem realizadas comparações dos níveis de clorofila com a regulamentação do CONAMA número 357, de 17 de Março de 2005, a cada passo de análise, o processo ficaria mais lento.

A segunda opção é realizar o processo de planejamento completo e a cada intervalo, determinar qual o índice de clorofila-a previsto vinculado àquele nível de reservatório. Para o período analisado, são verificados quais foram os valores que extrapolaram a norma e calcular-se o novo volume a ser utilizado para restrição no processo de planejamento. Esse

novo valor é utilizado para iniciar novamente o planejamento para comparação com o caso base.

A análise comparativa das violações após a análise completa do planejamento é mais eficiente em termos de tempo computacional. Porém, análise comparativa das violações a cada intervalo garante correção imediata do volume de operação do reservatório e impõe esse novo valor de volume ao próximo intervalo de análise, garantindo assim de operação mais realista e dinâmica.

Capítulo 5

Inclusão da Variável Ambiental no Planejamento da Operação de Sistemas – Estudo de Casos

5.1- MATERIAL E MÉTODOS

O banco de dados utilizado nas simulações para obtenção da metodologia proposta foi cedido pela CESP, Companhia Energética de São Paulo. A CESP permitiu a utilização desses dados para os estudos e pesquisas referentes à tese.

Os dados fornecidos pela CESP compreendem informações físico-químicas e hidrológicas obtidas por amostragem em diversos pontos de coleta (Anexo 2), ao longo dos reservatórios, bem como de tributários do sistema, que compreendem amostras mensais em um período de 5 anos.

Os dados físico-químicos e hidrológicos pertencem a três usinas de acumulação e uma fio d'água, representando parte de um sistema em cascata na Bacia do Rio Paraná. As usinas contempladas com as informações são: Ilha Solteira, Jupia (fio d'água), Porto Primavera e Três Irmãos. Os dados são apresentados em uma série temporal de cinco anos, que compreende meses de Janeiro a Dezembro. (sendo que Janeiro, Fevereiro, Março, Novembro, Dezembro considerados meses de chuva; Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro considerados meses de seca; e Abril e Outubro meses de transição).

A usina de Ilha Solteira está localizada em S 20° 22' 15,6" e W 51° 21' 32,5", no Rio Paraná entre os municípios de Ilha Solteira (SP) e Selvíria (MS), com potência instalada de 3.444,0 MW. Possui 20 unidades geradoras, ocupa área de 1.195 km², com volume útil de 5.516 x 10⁶ m³.

O canal Pereira Barreto, com 9.600 m de comprimento, interliga os reservatórios das usinas de Ilha Solteira e de Três Irmãos, propiciando a operação integrada dos dois aproveitamentos hidrelétricos.

A usina de Porto Primavera, também conhecida como usina Engenheiro Sérgio Mota, está localizada em S 22° 27' 22,6" e W 52° 54' 20,8" no Rio Paraná, 28 km a montante da

confluência com o Rio Paranapanema, com potência instalada de 1.540 MW. Possui 14 unidades geradoras, ocupa área de 2.250 km², com volume útil de 4.300 x 10⁶ m³.

A usina de Três Irmãos está localizada S 20° 40' 24,8" e W 51° 08' 47,0" no Rio Tietê, entre os municípios de Andradina e Pereira Barreto (SP), a 28 km da confluência com o Rio Paraná, com potência instalada de 807,50 MW. Possui 05 unidades geradoras, ocupa área de 785 km², com volume útil de 3.450 x 10⁶ m³.

A precipitação é bem definida com meses de seca em Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro, meses de chuva em Janeiro, Fevereiro, Março, Novembro e Dezembro, e podem ser considerados de transição os meses de Abril e Outubro (Anexo 1).

As amostras de água foram coletadas mensalmente no período de 2000 a 2005, nos quatro reservatórios em pontos próximos a barragem, a montante, a jusante e nos tributários. O anexo 2 mostra os pontos e as coordenadas das amostras retiradas e analisadas. As amostragens foram realizadas para os níveis de superfície, meio e fundo para as seguintes variáveis: Temp. H₂O (°C), pH, OD (mg L⁻¹), Condutividade (uS cm⁻¹), Alcalinidade (mg L⁻¹), Nitrogênio Org. (µg L⁻¹), Fósforo Total (µg L⁻¹), Turbidez (NTU) e Clorofila (µg L⁻¹). As profundidades variaram de 0, 2 e 4 metros quando se trata de amostragem nas margens dos tributários e da barragem e até 50 metros quando se trata de pontos no meio do reservatório a montante. Os métodos utilizados para cada tipo de análise físico-química não foram fornecidos.

A análise estatística dos dados clorofila-a, fósforo e volume útil do reservatório com o objetivo de definir um polinômio que expressasse a inter-relação destas variáveis foi realizada utilizando o software Matlab. Esta relação é a restrição ambiental a ser agregada ao planejamento da operação de sistemas elétricos, ou seja, objetiva-se implementar um simulador para planejamento da operação dos reservatórios de usinas hidrelétricas que agregue ao sistema de decisão a restrição ambiental.

Utilizou-se o software denominado Sistema de Apoio ao Planejamento Energético (SAPE), uma plataforma em Java, desenvolvido em C, no qual implementou-se o simulador de qualidade de água (Anexo 3). A interface cujas telas são apresentadas no anexo 3 foram desenvolvidas por Arruda (2007).

Dentre os pontos de medições fornecidos pela CESP, foram utilizados os pontos do reservatório mais próximo à barragem. A concentração de nutrientes aliados às condições favoráveis para desenvolvimento de algas apresenta valores mais elevados de concentração de clorofila-a, sendo então o ponto de maior interesse para análise. Próximo aos tributários tanto em tempo de seca como de chuva, ocorre uma maior mistura de água o que dilui a

concentração desses elementos e altera a turbidez da água desfavorecendo estão o desenvolvimento de algas. A maior alteração referente ao uso de água para geração de energia elétrica se dá imediatamente a montante da barragem, no reservatório.

A partir de dados de monitoramento físico-químico da água e do volume útil mensal do reservatório, determinou-se a relação do volume do reservatório x clorofila-a e fósforo. Esta relação foi determinada a partir dos dados disponibilizados pela CESP e dados de volume útil mensal, obtidos no site do ONS (ONS, 2007).

Foram realizadas três diferentes análises: um único polinômio anual, um polinômio para meses de seca e um polinômio para os meses de chuva.

A divisão sazonal foi realizada com base nos dados dos índices pluviométricos fornecidos pela CESP. Definiu-se a divisão sazonal em dois períodos durante o ano, sendo considerado como primeiro o de chuva – Janeiro, Fevereiro, Março, Novembro e Dezembro, e como segundo o de estiagem – Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro. Os meses de Abril e Outubro foram considerados transição, visto que os valores dos níveis não se enquadram integralmente em nenhuma das duas faixas. O anexo 1 apresenta a planilha dos índices pluviométricos utilizada para separação dos períodos.

5.2- RESULTADOS

5.2.1- POLINÔMIO CLOROFILA-A = $f(\text{VOLUME UTIL, FÓSFORO})$

Foram realizadas duas diferentes formas de análise: a) a determinação de um único polinômio genérico para o ano e b) a determinação de um polinômio para chuva e um para seca (meses de chuva compõem a amostra de chuva e meses de seca determinam o polinômio para o período de seca). As tabelas 5.1 a 5.6 apresentam alguns dos polinômios de clorofila em função de duas variáveis, fósforo e volume útil calculados para as usinas de Ilha Solteira e Três Irmãos, para períodos de seca e chuva e genérico.

Os dados de clorofila-a, fósforo total e volume útil do reservatório foram analisados estatisticamente, no intuito de estabelecer relação entre clorofila-a e volume do reservatório. Foram realizadas análises para os valores de clorofila-a e fósforo logaritimizados e não logaritimizados, volume útil mensal, variação do volume útil mensal e valor absoluto dessa variação.

Separando a análise dos dados em período de seca e de chuva, buscou-se uma melhor representatividade do polinômio, uma vez que se esperava um comportamento diferenciado dos reservatórios nestes dois períodos. Determinou-se o polinômio para os três reservatórios, Três Irmãos, Porto Primavera e Ilha Solteira, sendo que como nos meses de chuva foram considerados os meses de Janeiro, Abril, Março, Novembro e Dezembro e como meses de seca foram considerados os meses de Junho, Julho e Setembro.

A análise anual a princípio imaginou-se não ser boa escolha, em função da sazonalidade dos efeitos na qualidade de água do reservatório ditado pelas variações climáticas (temperatura, precipitação, e outras questões que alteram as características limnológicas do reservatório).

A representação única, um polinômio anual por reservatório não caracterizou nenhum padrão de ocorrência, quer seja de floração, quer seja de estratificação térmica. A representação do polinômio com divisão sazonal para os reservatórios de Três Irmãos e Ilha Solteira apresentou características diferentes para seca e chuva, sendo que para seca pode-se evidenciar a estratificação térmica da coluna d'água em função da alteração dos coeficientes do polinômio.

Foram realizadas também análises estatísticas da relação de clorofila-a com função de volume útil e fósforo separadamente, com o intuito de observar a interdependência destas variáveis. O anexo 4 apresenta algumas das relações obtidas. No entanto, optou-se por aplicar ao planejamento da operação um polinômio que agregasse a dependência de clorofila-a em relação a duas variáveis, variação do volume útil do reservatório e fósforo.

As tabelas 5.1 a 5.3 apresentam os polinômios anuais para o reservatório de Ilha Solteira, para as profundidades amostradas.

A tabela 5.1 contém os coeficientes A_0 , A_1 e A_2 do polinômio da equação 5.1, calculados para o reservatório de Ilha Solteira, sendo clorofila-a em $\mu\text{g L}^{-1}$, fósforo em $\mu\text{g L}^{-1}$ e volume útil do reservatório em %.

$$\text{Clorofila} - a = A_0 + A_1 \text{fósforo} + A_2 \text{Volume útil} \quad (5.1)$$

Tabela 5.1- Coeficientes do polinômio anual $\text{clorofila} = f(\text{fósforo}, \text{volume útil})$ da usina de Ilha Solteira.

Reservatório de Ilha Solteira				
Ano	Profundidade [m]	Coeficientes		
		A0	A1	A2
2000				
	0,01	-6,0575	1,0543	-0,4459
	25,0	0,2909	0,0441	-0,032
	50,0	-1,1629	-0,0158	0,0438
2001	0,01	-2,9766	0,0136	0,1131
	25,0	6,4058	-0,0632	-0,0288
	50,0	-0,723	0,0162	0,0384
2002	0,01	-6,5948	0,2357	0,0709
	25,0	1,1872	0,0895	-0,0296
	50,0	0	0	0
2003	0,01	-10,5862	0,2977	0,0828
	10,0	-6,9685	0,2258	0,0568
	20,0	-1,3286	0,0885	0,0084
	30,0	-0,8645	0,0595	0,0075
	40,0	-0,1291	0,0056	0,0036
	50,0	-0,1719	0,0085	0,0019
	55,0	-0,3585	-0,0212	0,0143

A tabela 5.2 contém os coeficientes A0, A1 e A2 do polinômio da equação 5.2, calculados para o reservatório de Ilha Solteira, sendo clorofila-a em valores percentuais (%), fósforo em valores percentuais (%) e volume útil do reservatório em valores percentuais (%).

$$\text{Clorofila} - a = A_0 + A_1 \text{fósforo} + A_2 \text{Volume útil} \quad (5.2)$$

Tabela 5.2- Coeficientes do polinômio anual $\text{clorofila} = f(\text{fósforo}, \text{volume útil})$ da usina de Ilha Solteira.

Reservatório de Ilha Solteira				
Ano	Profundidade [m]	Coeficientes		
		A0	A1	A2
2000	0,01	-20,1917	1,0543	-1,4862
	25,0	0,9696	0,0441	-0,1065
	50,0	-3,8764	-0,0158	0,1462
2001	0,01	-9,922	0,0136	0,377
	25,0	21,3527	-0,0632	-0,0959
	50,0	-2,4101	0,0162	0,1279
2002	0,01	-21,9825	0,2357	0,2364
	25,0	3,9572	0,0895	-0,0986
	50,0	0	0	0
2003	0,01	-35,2874	0,2977	0,2759
	10,0	-23,2283	0,2258	0,1893
	20,0	-4,4287	0,0885	0,028
	30,0	-0,8645	0,0595	0,0075
	40,0	-0,1291	0,0056	0,0036
	50,0	-0,1719	0,0085	0,0019
	55,0	-0,3585	-0,0212	0,0143

A tabela 5.3 contém os coeficientes A0, A1 e A2 do polinômio da equação 5.3, calculados para o reservatório de Ilha Solteira, sendo clorofila-a em $\mu\text{g L}^{-1}$, fósforo em $\mu\text{g L}^{-1}$ e volume útil do reservatório em valores percentuais (%).

$$\text{Log}(\text{Clorofila} - a) = A_0 + A_1 \text{Log}(\text{fósforo}) + A_2 \Delta \text{Volume útil} \quad (5.3)$$

Tabela 5.3- Coeficientes do polinômio anual $\text{Log}(\text{clorofila}) = f(\text{Log fósforo}, \text{delta volume útil})$ da usina de Ilha Solteira.

Reservatório de Ilha Solteira				
Ano	Profundidade [m]	Coeficientes		
		A0	A1	A2
2000	0,01	-1,561	1,019	-0,041
	25,0	-0,601	0,520	0,009
	50,0	-0,627	0,574	0,013
2001	0,01	-0,5072	0,5039	0,0278
	25,0	0,014	0,3246	0,0249
	50,0	-0,6063	0,551	0,0088
2002	0,01	-1,7781	1,8345	0,0290
	25,0	-0,4475	0,4608	-0,0019
	50,0	0,0000	0,0000	0,0000
2003	0,01	-1,5928	1,3657	0,0044
	10,0	-1,1784	1,1243	-0,0025
	20,0	-0,2598	0,3526	-0,0004
	30,0	-0,5506	0,6068	0,0005
	40,0	-0,0026	0,0625	0,0042
	50,0	-0,1002	0,1131	0,0024
	55,0	0,0048	0,0712	-0,0061

A tabela 5.4 contém os coeficientes A0, A1 e A2 do polinômio da equação 5.4, calculados para o reservatório de Ilha Solteira, sendo clorofila-a em $\mu\text{g L}^{-1}$, fósforo em $\mu\text{g L}^{-1}$ e volume útil do reservatório em valores percentuais (%). Os polinômios foram determinados por sazonalidade, período de chuva, período de seca e genérico.

$$\text{Log}(\text{Clorofila} - a) = A_0 + A_1 \text{Log}(\text{fósforo}) + A_2 \Delta \text{Volume útil} \quad (5.4)$$

Tabela 5.4- Usina de Ilha Solteira, $\text{Log}(\text{clorofila}) = f(\text{Log fósforo}, \text{delta volume útil})$ polinômio genérico e polinômios de seca e chuva.

Reservatório de Ilha Solteira				
Tipo	Profundidade [m]	A0	A1	A2
Chuva	0,01	-0,0113	0,1222	0,0067
	10,0	-0,0507	0,1378	0,0077
	20,0	-0,1091	0,1576	0,0082
	30,0	-0,0410	0,0725	0,0072
	40,0	0,0467	-0,0164	0,0042
	50,0	0,0000	0,0000	0,0000
Seca	0,01	0,1811	-0,0036	0,0196
	10,0	0,0651	0,1448	0,0144
	20,0	-0,0364	0,201	0,0109
	30,0	-0,1421	0,2907	-0,0052
	40,0	-0,2058	0,2629	-0,0027
	50,0	-0,1168	0,1258	-0,0014
Genérico	0,01	-0,1045	0,2916	0,0024
	10,0	-0,0829	0,2269	0,0061
	50,0	-0,1531	0,2045	0,0020

As tabelas 5.5 e 5.6 apresentam os polinômios anuais para o reservatório de Três Irmãos, para as profundidades amostradas.

A tabela 5.5 contém os coeficientes A0, A1 e A2 do polinômio da equação 5.5, calculados para o reservatório de Três Irmãos, sendo clorofila-a em $\mu\text{g L}^{-1}$, fósforo em $\mu\text{g L}^{-1}$ e volume útil do reservatório em valores percentuais (%).

$$\text{Clorofila} - a = A_0 + A_1 \text{fósforo} + A_2 \text{Volume útil} \quad (5.5)$$

Tabela 5.5- Coeficientes do polinômio anual *clorofila=f(fósforo, volume útil)* da usina de Três Irmãos.

Reservatório de Três Irmãos				
Ano	Profundidade [m]	Coeficientes		
		A0	A1	A2
2000	0,01	0,000	0	0
	20,0	0,936	0,079	-0,033
	40,0	1,559	-0,0227	-0,0095
2001	0,01	-2,530	-0,0334	0,0953
	20,0	-2,117	0,1768	0
	35,0	0,000	0	0
2002	0,01	-3,070	0,005	0,053
	20,0	-2,555	0,0073	0,0431
	40,0	-0,123	0,015	-0,002
2003	0,01	113,715	-16,596	-0,9263
	20,0	-4,939	0,277	0,0042
	40,0	10,247	-0,0377	-0,0837
2004	0,01	37,859	-0,4164	-0,3956
	20,0	30,010	-0,317	-0,3084
	40,0	0,000	0,000	0,000
2005	0,01	17,207	0,3006	-0,2291
	20,0	18,122	0,0968	-0,2172
	35,0	11,440	0,069	-0,1447

A tabela 5.6 contém os coeficientes A0, A1 e A2 do polinômio da equação 5.6, calculados para o reservatório de Três Irmãos, sendo clorofila-a em valores percentuais (%), fósforo em valores percentuais (%) e volume útil do reservatório em valores percentuais (%).

$$Clorofila - a = A_0 + A_1 fósforo + A_2 Volume\ útil \quad (5.6)$$

Tabela 5.6- Coeficientes do polinômio anual $clorofila = f(fósforo, volume\ útil)$ da usina de Três Irmãos.

Reservatório de Três Irmãos				
Ano	Profundidade [m]	Coeficientes		
		A0	A1	A2
2000	0,01	0,000	0	0
	20,0	3,120	0,0786	-0,1093
	40,0	5,196	-0,0227	-0,0317
2001	0,01	-8,434	-0,0334	0,3178
	20,0	-7,056	0,1768	0
	35,0	0,000	0	0
2002	0,01	-10,232	0,0049	0,1772
	20,0	-8,518	0,0073	0,1438
	40,0	-0,4105	0,0151	-0,0066
2003	0,01	379,050	-1,660	-3,088
	20,0	-16,462	0,277	0,014
	40,0	34,156	-0,038	-0,279
2004	0,01	126,197	-0,416	-1,319
	20,0	100,032	-0,317	-1,028
	40,0	0,000	0,000	0,000
2005	0,01	57,357	0,3006	-0,7638
	20,0	60,406	0,0968	-0,7239
	35,0	38,134	0,069	-0,4824

A tabela 5.7 contém os coeficientes A0, A1 e A2 do polinômio da equação 5.7, calculados para o reservatório de Três Irmãos, sendo clorofila-a em $\mu\text{g L}^{-1}$, fósforo em $\mu\text{g L}^{-1}$ e volume útil do reservatório em valores percentuais (%). Os polinômios foram determinados por sazonalidade, período de chuva, período de seca e genérico.

$$\text{Log}(\text{Clorofila} - a) = A_0 + A_1 \text{Log}(\text{fósforo}) + A_2 \Delta \text{Volume útil} \quad (5.7)$$

Tabela 5.7- Usina de Três Irmãos, $\text{Log}(\text{clorofila}) = f(\text{Log fósforo}, \text{delta volume útil})$ polinômio genérico e polinômios de seca e chuva.

Reservatório de Três Irmãos				
Tipo	Profundidade [m]	Coeficientes		
		A0	A1	A2
Chuva	0,01	1,6419	-0,9885	-0,0090
	24,0	2,2123	-1,5140	-0,0105
	48,0	0,648	-0,3875	-0,0033
Seca	0,01	0,2661	-0,1073	-0,0221
	24,0	0,3550	-0,1591	-0,0210
	48,0	-0,2589	0,3005	-0,0019
Genérico	0,01	0,4937	-0,1419	-0,0087
	24,0	0,6956	-0,3255	-0,0126
	48,0	0,0443	0,0558	-0,0027

5.2.2- A RESTRIÇÃO DE CLOROFILA-A NO SOFTWARE DE PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO

Estabeleceu-se relação do volume do reservatório com o nível de clorofila-a e de fósforo, polinômio característico do reservatório a ser aplicado como restrição no planejamento da operação de sistemas. A resolução do CONAMA número 357, de 17 de Março de 2005, estabelece como limites de clorofila-a até $30 \mu\text{g L}^{-1}$ e limites de fósforo de $30 \mu\text{g L}^{-1}$ (em ambientes lênticos) e de $50 \mu\text{g L}^{-1}$ (em ambientes intermediários, com tempo de

residência entre 20 e 40 dias, e tributários diretos de ambientes lênticos), para águas doce classe tipo II (MMA, resolução CONAMA 357, pág 10).

O processo de análise da restrição ambiental obedeceu ao seguinte procedimento, dado o novo volume do reservatório, esse é aplicado ao polinômio da clorofila como função de fósforo e volume, no qual é obtido o valor de clorofila-a para essa nova condição do reservatório.

O valor de clorofila-a obtido a partir da nova condição de volume do reservatório é comparado aos valores especificados pela a resolução do CONAMA número 357, de 17 de Março de 2005. No caso de atendimento à norma, o processo de planejamento passa então para o próximo intervalo de análise, visto que todas as restrições foram atendidas, inclusive a ambiental referente ao limite de clorofila.

Caso o valor de clorofila-a calculado seja superior ao valor especificado por norma, altera-se então o volume e defluência do reservatório para aquele intervalo de simulação, ou seja, aplica-se um decremento percentual no volume e um incremento percentual à defluência. Calcula-se o novo valor de clorofila que é novamente comparado aos limites especificados por norma. Enquanto o limite não for atendido, este processo se repete para o mesmo intervalo t , se o limite for atendido, passa-se então para o cálculo das variáveis do sistema para o intervalo $t+1$. Essa análise foi implementada para usinas tipo acumulação, uma vez que para usinas a fio d'água essa análise não se aplica.

Análises foram realizadas para polinômios de superfície e de polinômio médio das duas primeiras profundidades. As tabelas 5.8 e 5.9 apresentam os polinômios aplicados no planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos.

A tabela 5.8 contém os coeficientes A_0 , A_1 e A_2 do polinômio de superfície da equação 5.8 e a tabela 5.9 apresenta os coeficientes do polinômio obtido com a média das duas primeiras superfícies. Os polinômios são sazonais (seca, chuva e genérico), sendo clorofila-a em $\mu\text{g L}^{-1}$, fósforo em $\mu\text{g L}^{-1}$ e volume útil do reservatório em valores percentuais (%).

$$\text{Log}(\text{Clorofila} - a) = A_0 + A_1 \text{Log}(\text{fósforo}) + A_2 \Delta \text{Volume útil} \quad (5.8)$$

Tabela 5.8- Polinômio genérico e polinômios de seca e chuva aplicados na simulação $\text{Log clorofila}=f(\text{Log fósforo}, \text{delta volume útil})$, valores de superfície.

Reservatório	Tipo	Coeficientes		
		A0	A1	A2
Três Irmãos	Chuva	1,6419	-0,9885	-0,0090
	Seca	0,2661	-0,1073	-0,0221
	Genérico	0,4937	-0,1419	-0,0087
Ilha Solteira	Chuva	-0,0113	0,1222	0,0067
	Seca	0,1811	-0,0036	0,0196
	Genérico	-0,1045	0,2916	0,0024
Porto Primavera	Chuva	-1,814	1,590	-0,034
	Seca	0,5105	-0,1761	0,0447
	Genérico	0,0514	0,167	0,0171

Tabela 5.9- Polinômio genérico e polinômios de seca e chuva aplicados na simulação $\text{Log clorofila}=f(\text{log fósforo}, \text{delta volume útil})$, valor médio das duas primeiras profundidades.

Reservatório	Tipo	Coeficientes		
		A0	A1	A2
Três Irmãos	Chuva	1,9271	-1,2513	-0,0098
	Seca	0,3105	-0,1332	-0,0215
	Genérico	0,5946	-0,2337	-0,0106
Ilha Solteira	Chuva	-0,0310	0,1300	0,0072
	Seca	0,1231	0,0706	0,017
	Genérico	-0,0937	0,2592	0,0042
Porto Primavera	Chuva	-0,811	0,751	-0,019
	Seca	0,6588	-0,33375	0,0195
	Genérico	0,13105	0,0497	0,00885

O polinômio genérico se mostrou menos representativo do que um polinômio que agrega informações de semelhança entre os meses (meses de seca e meses de chuva). A separação em meses que possuam comportamento hidrológico semelhante se mostrou como melhor opção no que se refere à representatividade.

Para a simulação realizada na cascata do Rio Paraná foram escolhidas duas usinas, Ilha Solteira e Porto Primavera para inclusão da restrição ambiental. Neste caso pode-se observar a diferença de representação das características hidrológicas e da influência dessa representação nos efeitos causados na geração hidráulica e na energia armazenada dos reservatórios.

A influência da inserção de uma restrição ambiental no planejamento da operação não foi significativa, analisando-se a energia armazenada no reservatório e a geração hidráulica.

Comparando o caso base com a simulação para Ilha Solteira com inclusão do polinômio genérico, observou-se que a diferença na energia armazenada foi de 14,39%. Ao se utilizar o polinômio de seca e de chuva a diferença em relação ao caso base foi de 1,459% na energia armazenada. A geração hidráulica, por sua vez, foi menos afetada para ambos os polinômios. A diferença percentual do caso base em relação ao caso genérico para Ilha Solteira para a geração hidráulica foi de 0,306% e para o polinômio de seca e de chuva foi de 0,2942%.

Os gráficos das figuras 5.1 e 5.2 mostram para um período de 36 meses, os valores de energia armazenada do caso base, comparado ao caso com polinômio genérico e polinômio de seca e chuva para a cascata do Rio Paraná, respectivamente, onde se aplicou o simulador de qualidade de água para Ilha Solteira e Porto Primavera.

Os gráficos das figuras 5.3 e 5.4 mostram para um período de 36 meses, os valores de geração hidráulica do caso base, comparado ao caso com polinômio genérico e polinômio de seca e chuva para a cascata do Rio Paraná, respectivamente, onde aplicou-se o simulador de qualidade de água para Ilha Solteira e Porto Primavera.

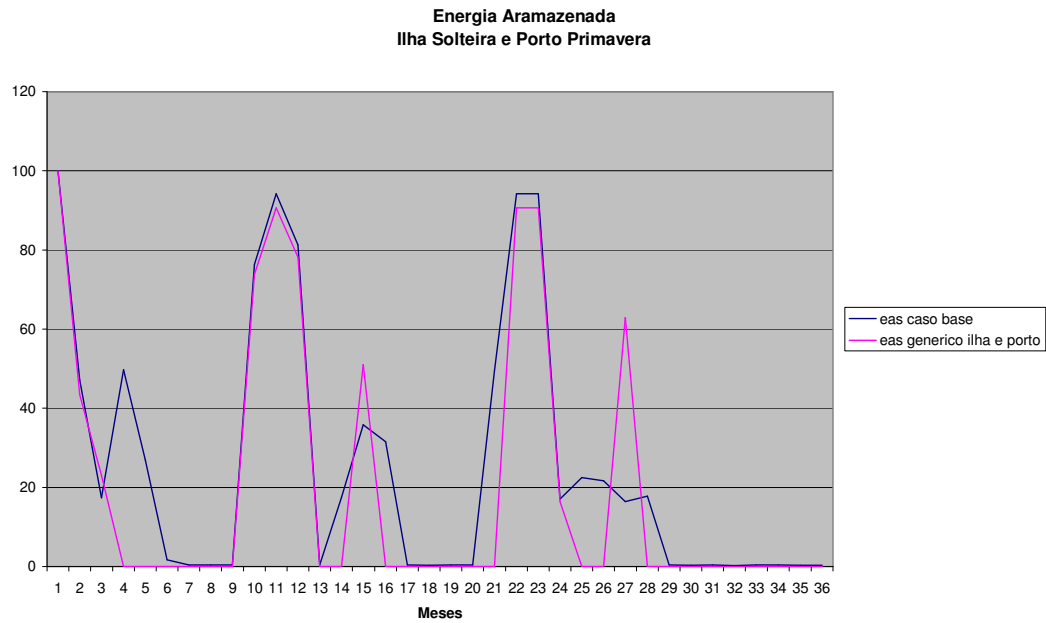


Figura 5.1- Energia armazenada simulação cascata Paraná, com Ilha Solteira e Porto Primavera, comparação resultados com polinômio genérico e caso base.

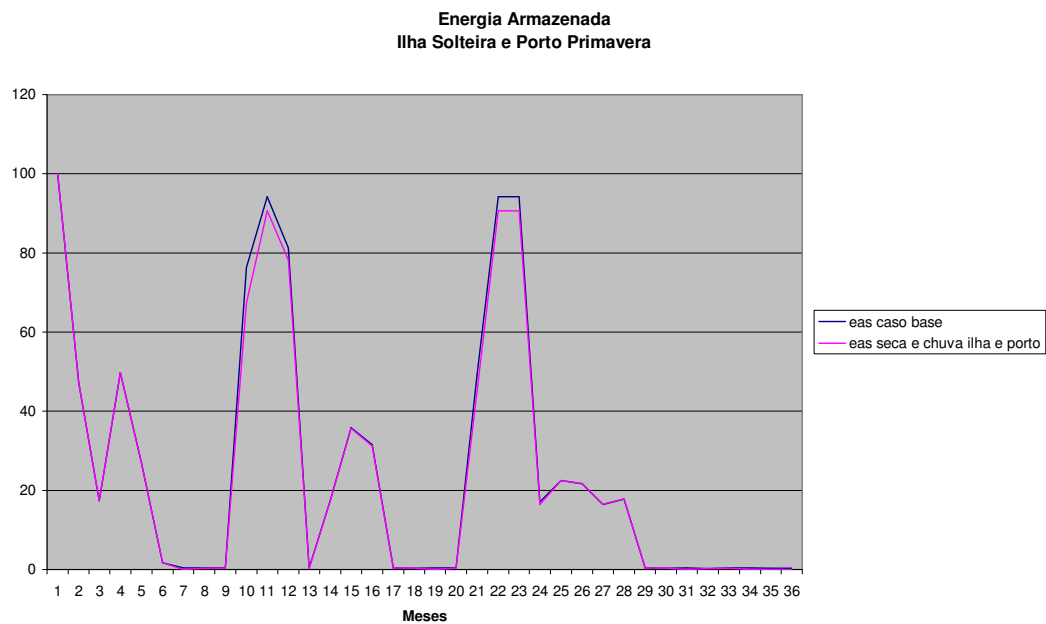


Figura 5.2- Energia armazenada simulação cascata Paraná, com Ilha Solteira e Porto Primavera, comparação resultados do caso base com polinômio de chuva e seca.

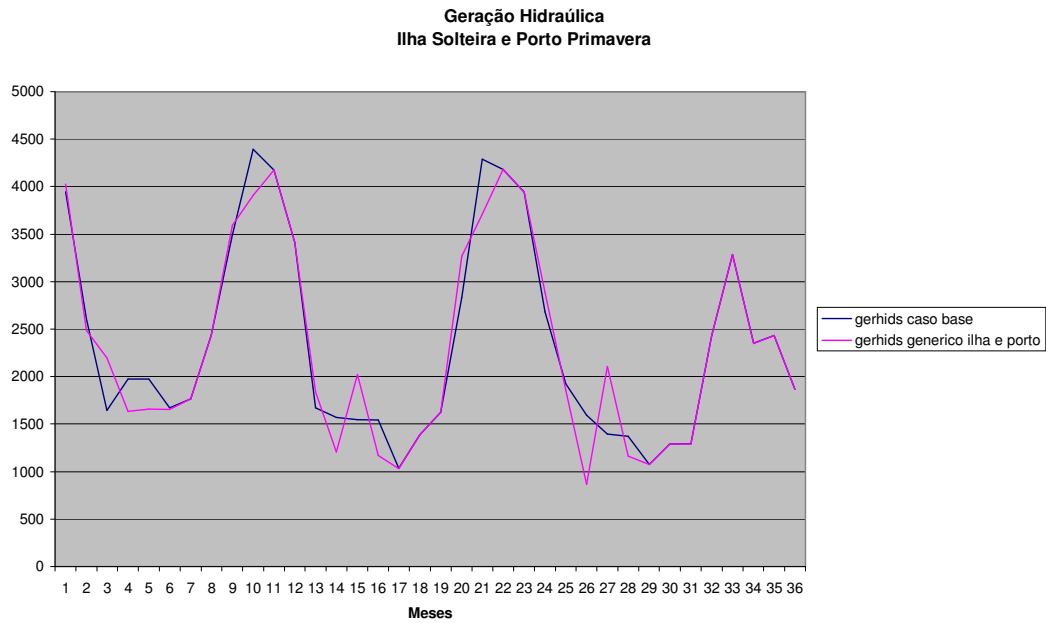


Figura 5.3- Geração Hidráulica simulação cascata Paraná, com Ilha Solteira e Porto Primavera, comparação resultados com polinômio genérico e caso base.

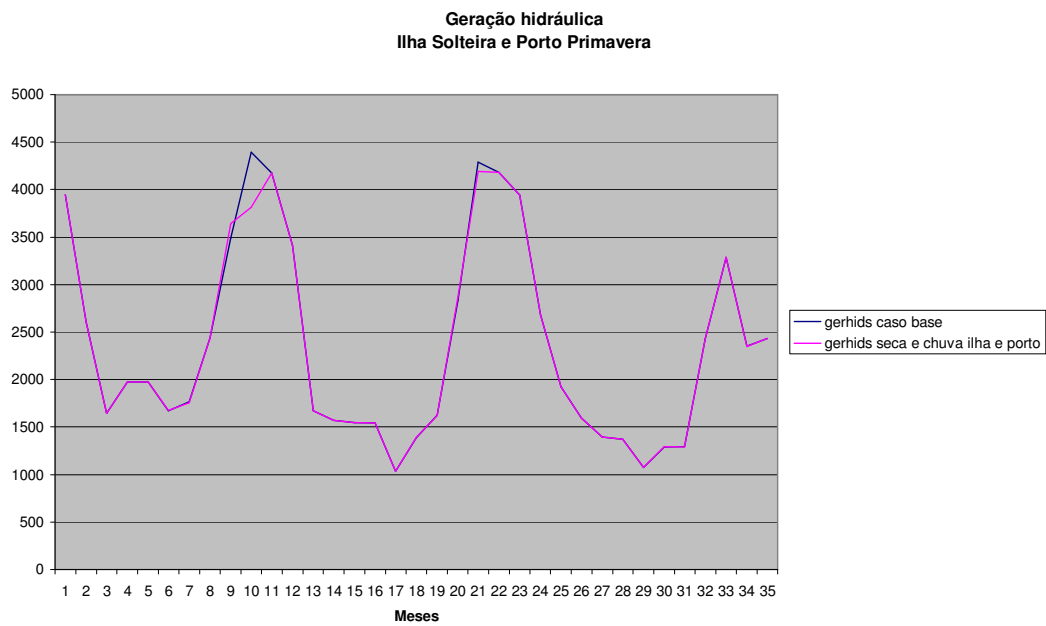


Figura 5.4- Geração Hidráulica simulação cascata Paraná, com Ilha Solteira e Porto Primavera, comparação resultados do caso base com polinômio de chuva e seca.

Os valores de variação percentual obtidos indicam que não houve alterações relevantes na geração das usinas, e, por conseguinte não houve alteração significativa na receita dessas gerações e nos custos do megawatt gerado, para a inclusão da variável clorofila-a como função do volume do reservatório e do fósforo nos mesmos.

A tabela 5.10 apresenta os resultados obtidos a partir das simulações para a cascata do Rio Paraná, onde foram escolhidas as usinas de Ilha Solteira e Porto Primavera. Os resultados da simulação se referem ao polinômio de superfície. Foram realizadas simulações para os seguintes casos:

A- Caso base, onde não há a restrição ambiental de qualidade de água aplicado às usinas;

B- Inclusão do polinômio genérico para o teste de qualidade de água somente para Ilha Solteira;

C- Inclusão do polinômio de chuva e de seca, para o teste de qualidade de água somente para Ilha Solteira;

D- Inclusão do polinômio genérico para o teste de qualidade de água somente para Porto Primavera;

E- Inclusão do polinômio de chuva e de seca, para o teste de qualidade de água somente para Porto Primavera;

F- Inclusão do polinômio genérico para o teste de qualidade de água para Ilha Solteira e Porto Primavera;

G- Inclusão do polinômio de chuva e de seca, para o teste de qualidade de água para Ilha Solteira e Porto Primavera;

Tabela 5.10- Valores obtidos quando da inclusão do polinômio de restrição ambiental para a simulação da cascata do Rio Paraná. (utilizando o polinômio de superfície da tabela 5.8)

Resultado Simulação	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E	Caso F	Caso G
Geração Hidráulica média [MW]	2252,958	2259,853	2259,587	2240,337	2244,781	2240,853	2251,476
Energia Armazenada média [%]	23,483	20,104	23,140	22,459	22,896	18,876	22,585
Número de violações Clorofila-a	xxx	600	172	600	303	1150	478

Os polinômios utilizados para essa simulação foram calculados a partir de dados de superfície (tabela 5.8). Porém levantou-se também um polinômio médio (tabela 5.9), ou seja, baseado na média dos polinômios das duas camadas superficiais, no intuito de buscar a representação daqueles elementos que deslocam da coluna d'água.

Os polinômios de superfície e médio são muito próximos, no que se refere aos valores dos seus elementos. Não houve alteração nos valores da geração hidráulica e energia armazenada da cascata quando da utilização do polinômio médio em relação ao polinômio de superfície.

Foram realizadas também simulações para a cascata do rio Tietê, onde está localizada a usina de Três Irmãos. Para os polinômios determinados (tabelas 5.8 e 5.9) tanto para seca e para chuva, quanto para o genérico, não houve alteração nos valores geração hidráulica e energia armazenada do sistema. Para todo o período analisado não houve para este reservatório violação dos limites de clorofila-a associado aos valores de fósforo medido.

Para efeito de análise utilizou-se o polinômio da cascata do rio Paraná (polinômio de seca e chuva das usinas de Ilha solteira e Porto Primavera) na cascata do rio Tiête, o número de violações de clorofila que tiveram que ser corrigidos em foi de 337 para análise de qualidade somente em Três Irmãos e 758 para análise de qualidade em Três Irmãos e Barra Bonita para o mesmo período de análise de 50 meses. Observou-se que com a utilização de polinômios não determinados a partir das características específicas das usinas, a geração hidráulica do estudo caiu para 92,53% do caso base e a energia armazenada caiu para 47,62% no segundo. Ao utilizar-se o polinômio genérico determinado para a cascata do Paraná no rio Tietê, o número de violações de clorofila foi de 1200 sendo que a geração hidráulica do estudo caiu para 87,29% e a energia armazenada caiu para 2,94% do caso base. A utilização de polinômios que não tenham sido determinados a partir dos dados das usinas, altera em

muito a operação dos reservatórios, o que reforça a teoria de que polinômios específicos por usinas, com representação sazonal são mais representativos.

Com base nas análises realizadas concluiu-se que os polinômios para representação do modelo de qualidade de água devem ser específicos de cada reservatório, determinados a partir de medições realizadas nos mesmos. Uma representação sazonal melhor agrega as características do sistema.

Casos com maior número de usinas em cascata, utilizando seus polinômios de restrição de qualidade da água, não puderam ser analisados devido ao limitado banco de dados. Porém considera-se que à medida que mais usinas utilizem suas restrições ambientais nas simulações, esses percentuais pequenos de variação passam a se somar e consequentemente o efeito possa ser mais pronunciado. É uma análise especulativa, porém intuitiva em relação à sobreposição de efeitos.

A inserção da variável limnológica clorofila-a como restrição ambiental no planejamento da operação de reservatórios não acarretou alterações significativas nos valores de geração hidráulica e energia armazenada da cascata. Não houve então alteração significativa dos custos da energia gerada, algo positivo para o setor elétrico.

A metodologia aplicada para clorofila-a pode ser aplicada a outras variáveis limnológicas que sejam regulamentadas por órgãos ambientais. Acredita-se que a inclusão de outras variáveis ambientais, mesmo que apresentando efeitos pouco significativos isoladamente, no conjunto a superposição de efeitos possa ser significativa.

Um maior banco de dados, tanto no que se refere à quantidade de dados por usina, como à quantidade de usinas amostradas melhoraria a representatividade do polinômio a ser determinado estatisticamente, e possibilitaria verificar a sobreposição de efeitos para mais usinas, respectivamente.

No caso da inserção de variáveis de caráter sócio-econômico essa metodologia não se aplicaria diretamente, pois uma relação do volume com essas características; por exemplo, valoração de sítios arqueológicos, perda cultural, realocação de populações; não teria como se estabelecer. Outras metodologias deveriam ser aplicadas para inclusão de restrição de caráter sócio-econômico-ambiental. Acredita-se que para essas variáveis, o ideal seria sua inclusão na função objetivo, como custo associado às questões ambientais.

Capítulo 6

Conclusão

Segundo a ANEEL, dos empreendimentos em operação no Brasil 23,87% utilizam outra forma de combustível que não a água, 79,22% destes utiliza combustíveis fósseis dos quais 22,08% é óleo diesel (dados de 2006) e 17,63% utilizam fontes renováveis. Ainda existe potencial de redução de 5% em função da utilização do biodiesel, o que acarretaria queda na emissão de carbono, tornando a matriz ainda mais sustentável (isso sem substituição de fontes primárias por outras formas de energia renovável).

Nos combustíveis de biomassa, a cana-de-açúcar predomina com 72,11% dos empreendimentos em operação no país e 53,25% dos em construção, o que garante melhor utilização dos resíduos da cultura agrícola e minimiza os impactos ambientais (ANEEL, 2006).

Segundo a ANEEL o potencial hidrelétrico brasileiro é de 261 GW dos quais 35 GW (14%) estão localizados no centro-oeste. Dos 35 GW de potencial hidrelétrico do estado de Goiás, 31% estão em operação, construção ou concessão, 23% inventariado e 46% estimado. Dos 69% do potencial hidrelétrico brasileiro a aproveitar, 70% se encontram nos biomas Cerrado e Amazônia, dos quais de 2 a 3% estão localizados no centro-oeste. Do potencial do país de pequenas centrais hidrelétricas, 19%, encontram-se no centro-oeste, sendo que 66% deste potencial ainda não são aproveitados. Em Goiás estão localizados 12.679 MW (36,22%) do potencial do centro-oeste (ANEEL, 2006).

Goiás equivale a 3,99% da área do Brasil, possui 3,03% da população brasileira e 2,38% do PIB do Brasil, possui 8,87% da capacidade instalada do país sendo o quarto estado em capacidade instalada, e o consumo per capita do estado é de 1,053 tep/hab, valor pequeno quando comparado ao do Brasil. Dos empreendimentos em operação e construção no estado existe predominância das hidrelétricas e pequenas centrais.

A matriz energética do centro-oeste e mais especificamente de Goiás apresenta predominância de fontes renováveis, principalmente como fonte primária hidráulica e o bagaço de cana para as termelétricas. Existe enorme potencial de pequenas centrais hidrelétricas a ser explorado, cujo preço por kW é inferior às demais fontes de energia renovável. Apresentam a grande vantagem da localização da fonte próxima aos pontos de demanda, reduzindo ainda o custo de transmissão e minimizando investimentos no setor de transmissão de energia.

O custo ainda é um obstáculo na utilização de fontes renováveis, tais como eólica e fotovoltaica, que apesar de serem formas mais limpas, são economicamente pouco atraentes. A hidroeletricidade e a biomassa para geração de energia são as formas de maior atratividade econômica. Porém, se forem aplicadas taxas/multas para emissões de CO₂ ou outros danos ambientais para determinadas fontes primárias, por exemplo, para combustível fóssil, algumas das formas anteriormente menos atraentes podem vir a ser consideradas investimentos justificáveis.

Os programas de monitoramento fornecem dados que efetivamente contribuem para a análise da tendência da qualidade do ecossistema aquático. As tendências obtidas a partir do monitoramento permitem que sejam realizadas ações de prevenção e correção que minimizem os danos causados pela eutrofização.

Dentre as mais diversas opções citadas de variáveis utilizadas para o biomonitoramento, observou-se que a clorofila-a e a carga de nutriente fósforo total são tidas como as de maior relevância e aplicação. Em alguns casos, a associação da riqueza das espécies fitoplancônicas aos níveis de clorofila e fósforo se mostrou ainda mais eficaz como determinante de índices de estado trófico (PEREIRA, 2003; BOZELLI, 2003).

O planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos não incorpora, nas suas restrições, a qualidade da água. A fim de incluir nas análises do planejamento, o enfoque do uso múltiplo da água, há a necessidade da inclusão de outras restrições, além das atualmente contempladas, nos *softwares* de planejamento utilizado pelo setor elétrico.

Tendo em vista as análises de profissionais da área ambiental, optou-se pela clorofila-a como variável ambiental a ser aplicada ao planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos, com o objetivo de minimizar os efeitos nocivos à qualidade da água, mais especificamente a eutrofização, criadas pela geração de energia elétrica.

O anexo 05 apresenta as restrições operativas hidráulicas das usinas simuladas retirado do “Inventário das restrições operativas hidráulicas dos aproveitamentos hidrelétricos”, revisão-0 de 2006, **ONS RE 3/364/2005**. Observa-se que não há nenhuma restrição operativa normalizada pelo ONS vinculada à qualidade da água quanto às suas características físico-químicas.

A escolha desta modelagem da restrição ambiental aplicada ao problema de planejamento se deveu a pesquisas anteriores, onde os pesquisadores definiram para lagos tropicais relações de clorofila-a e fósforo (CARVALHO, 2003; PEREIRA, 2003; WALKER, 2005; MARIANI, 2006).

Acredita-se ainda, que não haja um modelo padrão para reservatórios. Talvez em função da forma e profundidade possa se obter modelos semelhantes, porém para cada reservatório deve ser levantada essa relação, ou seja, uma característica individualizada do reservatório, da mesma forma como se tem um polinômio cota x volume para cada reservatório. O polinômio volume x clorofila x fósforo é específico do reservatório e poderá agregar informações mensais, sazonais ou anuais.

Na modelagem do planejamento a análise é realizada mês a mês, portanto um polinômio volume x clorofila por mês atende ao modelo. Acredita-se que a melhor opção seria o modelo do reservatório mensal, mais expressivo do que os polinômios separados por período de seca e chuva. Porém, o número de amostras mensais obtidas para levantamento do polinômio foi pequeno, não sendo o suficiente para determinação estatística do mesmo.

A representação do polinômio por períodos que levasse em conta a precipitação (meses de seca e meses de chuva) mostrou-se mais definido e expressivo, pois agrega informações de semelhança de comportamento das características limnológicas e comportamento hidrológico semelhante. Uma representação genérica por reservatório não expressa a diferença de características das variáveis, perdendo em termos de representatividade em relação aos polinômios independentes.

As análises mostraram que o efeito da inserção da variável ambiental, clorofila-a, como restrição operativa das usinas de acumulação não interferiu significativamente na geração de energia e energia armazenada do sistema. Consequentemente, não haveria variação nos custos do MW gerado, extremamente benéfico para o setor elétrico.

Implementou-se somente uma variável ambiental como restrição. Poderiam ser incluídas outras variáveis para a mesma metodologia, o que talvez fizesse com que os efeitos fossem mais significativos. Uma proposta para trabalhos futuros seria a inclusão de mais variáveis limnológicas nessa metodologia para análise simultânea dos efeitos. O ideal ainda é

que o pesquisador tivesse maior banco de dados de monitoramento ambiental, pois o maior obstáculo dessa pesquisa foi exatamente o pequeno volume de informação conseguido com as empresas de geração de energia. O monitoramento é obrigatório, porém ainda não está disponível aos pesquisadores.

ANEXO I

Precipitação Pluviométrica

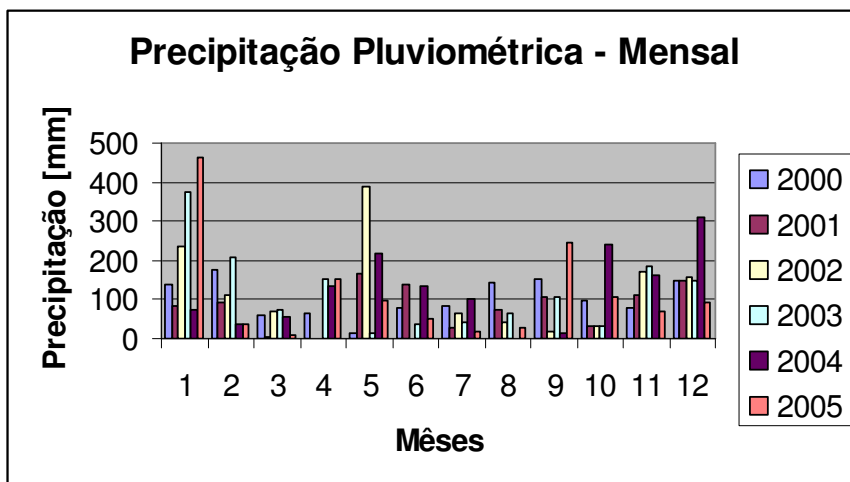


Figura A1.1- Evolução da Precipitação Pluviométrica - Porto Primavera - 2000/2005

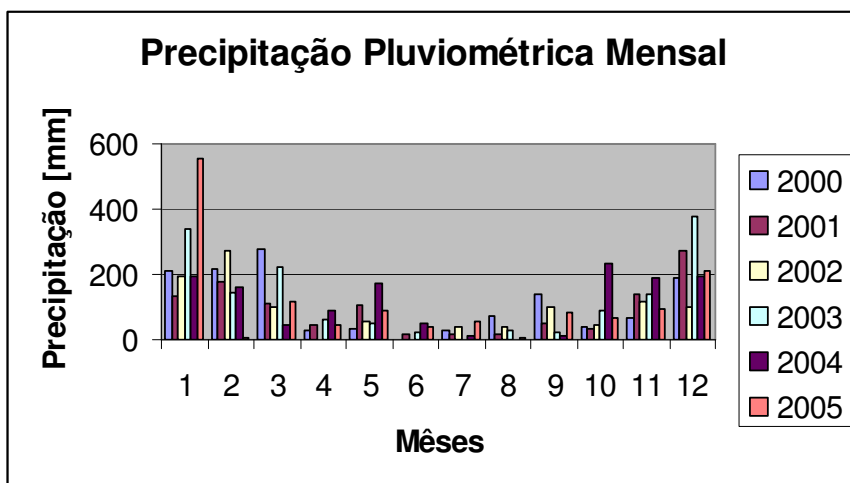


Figura A1.2- Evolução da Precipitação Pluviométrica - Ilha Solteira - 2000/2005

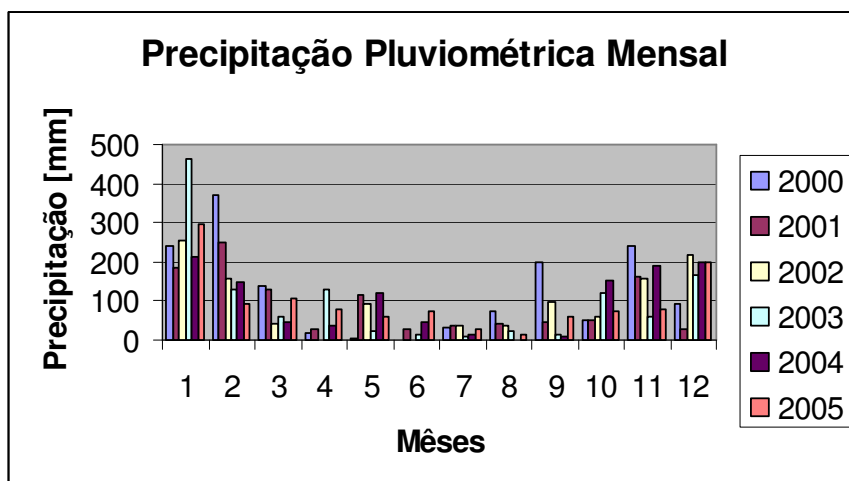


Figura A1.3- Evolução da Precipitação Pluviométrica - Três Irmãos - 2000/2005

ANEXO 2

Pontos Amostrados

VARIÁVEIS FÍSICO/QUÍMICO
Reservatório: UHE ILHA SOLTEIRA

Período: 2000 à 2005

Estação de Coleta: MONTANTE DE ILHA SOLTEIRA - MARGEM DIREITA, MEIO E MARGEM ESQUERDA

COORDENADAS

S 20° 22' 15,6"
W 51° 21' 32,5"

Estação de Coleta: JUSANTE DE ÁGUA VERMELHA - MARGEM DIREITA, MEIO E MARGEM ESQUERDA

COORDENADAS

S 19° 47' 44,1"
W 50° 25' 56,7"

Estação de Coleta: PORTO ITAMARATI - MARGEM DIREITA, MEIO E MARGEM ESQUERDA

COORDENADAS

S 20° 03' 41,3"
W 50° 58' 56,1"

Estação de Coleta: CORREGO CIGANO - MARGEM DIREITA, MEIO E MARGEM ESQUERDA

COORDENADAS

S 20° 14' 40,9"
W 51° 03' 18,0"

Estação de Coleta: RIO SÃO JOSÉ DOS DOURADOS - MARGEM DIREITA, MEIO E MARGEM ESQUERDA

COORDENADAS

S 20° 26' 0,7"
W 51° 15' 28,8"

Reservatório: UHE TRÊS IRMÃOS
VARIÁVEIS FÍSICO/QUÍMICO

Período: 2000 à 2005

Estação de Coleta: JUSANTE DE NOVA AVANHANDAVA

COORDENADAS

S 21° 07' 39,0"
W 50° 13' 03,6"

Estação de Coleta: JACARÉ

COORDENADAS

S 20° 51' 16,6"
W 50° 49' 38,9"

Estação de Coleta: PEREIRA BARRETO

COORDENADAS

S 20° 40' 24,8"
W 51° 08' 47,0"

Reservatório: UHE PORTO PRIMAVERA
VARIÁVEIS FÍSICO/QUÍMICO

Período: 2000 à 2005

Estação de Coleta: BARRAGEM PORTO PRIMAVERA - MARGEM ESQUERDA, MEIO E MARGEM DIREITA

COORDENADAS

S 22° 28' 04,8" W 52° 54' 29,3"
--

Estação de Coleta: JUSANTE DE JUPIÁ - MARGEM ESQUERDA, MEIO E MARGEM DIREITA

COORDENADAS

S 20° 51' 12,3" W 51° 37' 35,9"
--

Estação de Coleta: FOZ DO RIO VERDE - MARGEM DIREITA, MEIO E MARGEM ESQUERDA

COORDENADAS

S 21° 15' 11,5" W 51° 50' 55,6"
--

Estação de Coleta: FOZ DO RIO SANTO ANASTÁCIO - MARGEM ESQUERDA, MEIO E MARGEM DIREITA

COORDENADAS

S 21° 51' 21" W 52° 11' 23"
--

ANEXO 3

SAPE

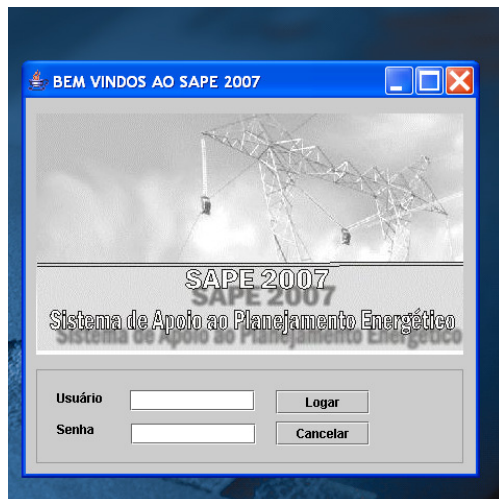


Figura A3.1- Tela inicial do Software SAPE 2007 (Arruda 2007).

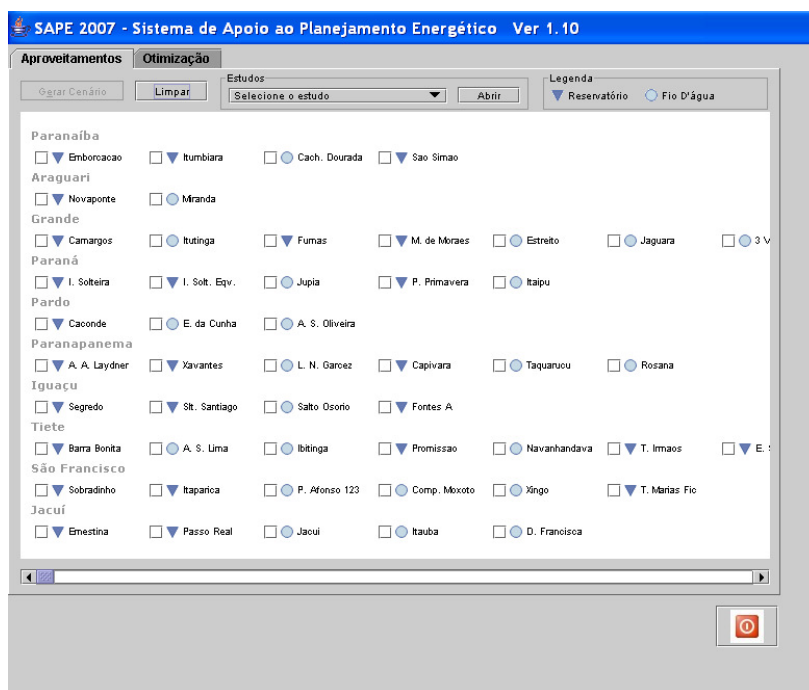


Figura A3.2- Tela para escolha do cenário a ser simulado, Software SAPE 2007 (Arruda 2007).

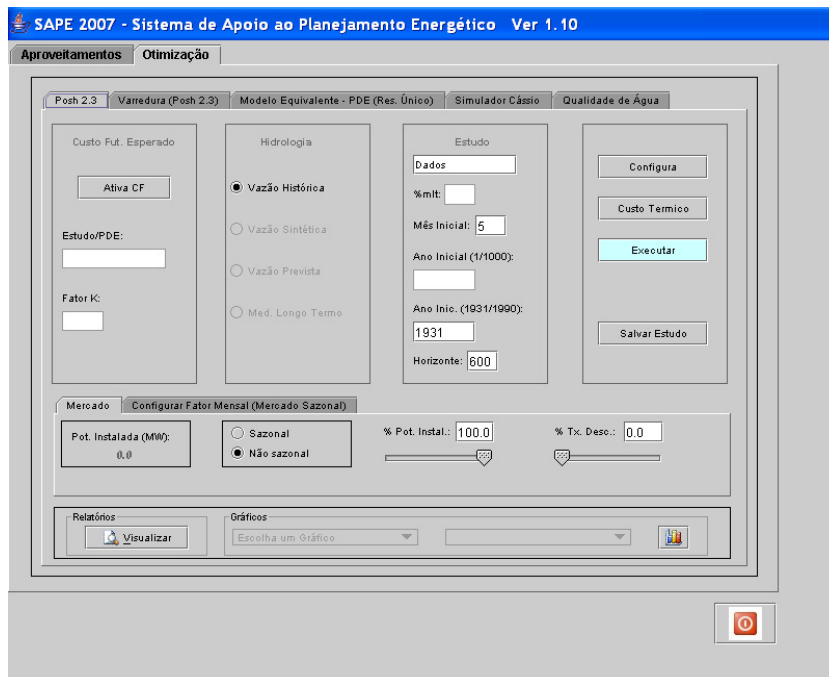


Figura A3.3- Tela para simulação do caso base, Software SAPE 2007 (Arruda 2007).

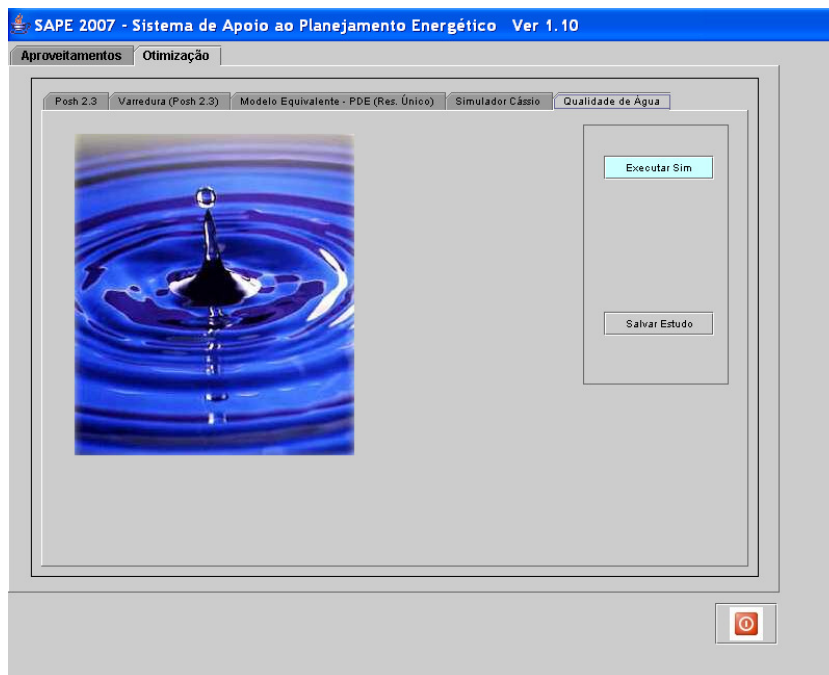


Figura A3.4- Tela para simulação do caso com a inclusão da variável ambiental, Software SAPE 2007 (Arruda 2007).

ANEXO 4

Análises estatísticas de algumas variáveis
físico-químicas e volume útil do reservatório

Foram analisados estatisticamente os seguintes dados: concentração de nutrientes, e clorofila-a, no intuito de estabelecer uma relação entre clorofila-a e volume do reservatório. Como o CONAMA também regulamenta a concentração de fósforo na água, este elemento também foi alvo das relações estatísticas além da clorofila-a.

Foram realizadas três diferentes formas de análise, determinação de um único polinômio para o ano, determinação de um polinômio para cada mês (amostra de um mesmo mês, todos os anos para compor o polinômio típico do mês) e determinação de um polinômio para chuva e um para seca (meses de chuva compõem a amostra de chuva e meses de seca determinam o polinômio para o período de seca).

Na análise realizada para um único polinômio anual, compôs-se um polinômio para cada um dos anos de 2000 a 2005, sendo cada ano composto pelos meses de amostra, por exemplo, Março, Julho, Setembro e Dezembro. Utilizou-se o volume do reservatório em percentual e a clorofila-a foi logaritimizada, não foi feita nenhuma normalização. Na relação $y=f(x)$, onde x é o volume do reservatório e y é a concentração de clorofila-a, observou-se para o reservatório de Ilha Solteira que para um polinômio de ordem três, houve uma semelhança no padrão do sinal dos coeficientes, onde b_0 e b_2 foram negativos em todos os anos para todas as profundidades amostradas ($b_0+b_1x+b_2x^2+b_3x^3$). Montou-se um polinômio de ordem dois, porém não foi tão expressivo (representativo) quanto o de maior ordem.

Para o reservatório de Três Irmãos, observou-se que para um polinômio de ordem dois ($b_0+b_1x+b_2x^2$), onde x é o volume do reservatório e y é a concentração de clorofila-a, para os anos de 2002, 2004 e 2005 houve semelhança no padrão dos sinais dos coeficientes para as profundidades de superfície e vinte metros, onde b_1 foi negativo. O coeficiente b_1 também foi negativo em 2000 para a profundidade de vinte metros e em 2001 na superfície (somente foram apresentadas medições para superfície, vinte metros e quarenta metros para a usina de Três Irmãos). O ano de 2003 apresentou um padrão completamente diferente dos demais anos, pois b_1 foi positivo em todas as profundidades.

A análise anual, não apresenta ser uma boa escolha, em função da sazonalidade dos efeitos na qualidade de água do reservatório ditado pelas variações climáticas (temperatura, precipitação, e outras questões que alteram as características limnológicas do reservatório).

Separando a análise dos dados em período de seca e de chuva, buscou-se melhor a representatividade do polinômio já que se esperava um comportamento diferenciado dos reservatórios nestes dois períodos. Foi montado então o polinômio para os dois reservatórios,

Três Irmãos e Ilha Solteira, sendo que foi considerado (sem análise dos índices pluviométricos) mês de chuva como sendo os meses de Janeiro, Abril, Março, Novembro e Dezembro e mês de seca os meses de Junho, Julho e Setembro, dentre os meses amostrados.

Para a usina de Ilha Solteira, no polinômio x =volume útil do reservatório e y =clorofila-a, para a representação utilizando o polinômio de ordem seis, o que apresentou erro menor do que um polinômio de ordem três, os padrões foram diferentes para os períodos de seca e chuva. Para o período de seca os coeficientes b_0 , b_2 , b_4 e b_6 foram negativos, enquanto que para o período de chuva b_1 , b_3 e b_5 foram negativos. Porém utilizando-se um polinômio de ordem três, os padrões de seca e chuva foram semelhantes, nas profundidades de superfície, dez e vinte metros, com b_1 e b_3 negativos.

Para a usina de Três Irmãos a análise para x =volume útil do reservatório e y =clorofila-a, o polinômio de ordem três apresentou padrão semelhante para profundidades de zero e dez metros para os períodos de chuva e seca, b_1 e b_3 negativos.

Esperava-se que para períodos distintos essa relação fosse também distinta, porém isso não ficou comprovado para a usina de Três Irmãos e nem para a usina de Ilha Solteira quando foi utilizado um polinômio de ordem três. Isto pode ser justificado, talvez, devido a pequena amostragem dos meses de seca, somente dois meses, o que faz com que haja uma perda na representatividade da amostra.

Para a relação x =volume útil e y =fósforo, na usina de Três Irmãos não foi observado a diferença de padrão entre os períodos de chuva e seca. Os polinômios de ordem três apresentaram padrões idênticos, b_0 e b_2 negativos para todas as três profundidades, superfície, vinte e quarenta metros. Para a usina de Ilha Solteira, observou-se o mesmo fato, padrões idênticos para períodos diferentes, chuva e seca apresentaram b_1 e b_3 negativo para profundidades de superfície a cinquenta metros (de dez em dez metros), exceto para superfície do mês de chuva onde não houve medição.

As tabelas 1 a 8 apresentam alguns dos polinômios levantados para as usinas de Ilha Solteira e Três Irmãos, para períodos de seca e chuva. As tabelas referentes às análises anuais não foram apresentadas, apesar de terem sido comentadas.

Para os meses de seca para a análise de volume útil e clorofila em Ilha Solteira até 20 metros de profundidade os elementos do polinômio foram semelhantes, em 30 metros se alteraram e para 40 e 50 metros foram semelhantes novamente (tabela 2). Para Três Irmãos, no período de seca as profundidades de 0 e 20 metros apresentaram comportamento semelhantes e a profundidade de 40 metros apresentou padrão oposto (tabela 8). Já para os

meses de chuva o comportamento foi o mesmo para as todas as profundidades amostradas, não caracterizando assim estratificação térmica (tabelas 1 e 7).

Tabela 1- Levantamento para usina de Ilha Solteira, mês de chuva.

				Janeiro, Março, Novembro e Dezembro					
Ilha	Mês de chuva								
prof [m]	x=pvutil01	y= (pclor01)+1				x=pft01	y= (pclor01)+1		
	Bo	b1	b2	b3		bo	b1	b2	b3
0,0	0,567	-2,796	4,746	-2,649		0,000	0,000	0,000	0,000
10,0	1,234	-6,541	11,443	-6,449		-0,453	1,275	-0,834	0,151
20,0	0,537	-3,846	8,134	-5,215		-2,091	7,259	-7,507	2,404
30,0	0,554	-3,952	8,283	-5,215		0,638	-2,585	3,240	-1,187
40,0	0,647	-3,951	7,560	-4,507		1,367	-5,367	6,712	-2,628
50,0	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 2- Levantamento para usina de Ilha Solteira, mês de seca

				Julho e Setembro					
Ilha	Mês de seca								
prof [m]	x=pvutil01	y= (pclor01)+1				x=pft01	Y= (pclor01)+1		
	bo	b1	b2	b3		bo	B1	b2	b3
0,0	8,5504	-47,5706	87,2145	-52,4942		1,3922	-2,6418	1,0426	0,1504
10,0	1,2617	-9,4451	20,6494	-13,6734		2,1274	-4,6163	2,7648	-0,2462
20,0	5,9122	-31,0638	53,256	-29,5794		0,6264	-0,7683	0,1195	0,008
30,0	-8,5219	46,2159	-83,305	49,9966		-0,5882	1,7852	-1,3592	0,2998
40,0	0,328	0,2726	-4,4224	5,1554		1,1413	-2,6652	1,701	-0,2557
50,0	0,1238	0,1029	-1,6689	1,9456		0,6258	-1,8572	1,6032	-0,3642

Tabela 3- Levantamento para usina de Ilha Solteira, mês de chuva

			Janeiro, Março, Novembro e Dezembro	
Ilha	Mês de chuva			
prof [m]	x=vutil	y= pft		
	bo	b1	B2	b3
0,0	nan			
10,0	17,823	-84,986	131,303	-64,040
20,0	3,838	-16,396	21,361	-6,742
30,0	10,530	-49,254	74,274	-34,581
40,0	11,351	-53,472	81,605	-38,819
50,0	11,490	-54,400	83,648	-40,293

Tabela 4- Levantamento para usina de Ilha Solteira, mês de seca

			Julho e Setembro	
Ilha	mês de seca			
prof [m]	x=vutil	y= pft		
	bo	b1	B2	b3
0,0	6,010	-38,699	77,669	-48,312
10,0	6,263	-38,549	74,945	-45,463
20,0	28,433	-148,506	255,356	-143,457
30,0	21,955	-116,458	203,116	-115,366
40,0	36,334	-189,279	324,637	-182,079
50,0	26,823	-143,085	250,412	-142,467

Tabela 5- Levantamento para usina de Três Irmãos, mês de seca.

Três Irmãos			Junho e Setembro	
	Mês de seca			
prof [m]	x=vutil	y= pft		
	bo	b1	b2	b3
0,0	-6,9044E+01	3,5080E+02	-5,9022E+02	3,2998E+02
20,0	-8,1309E+01	4,1824E+02	-7,1275E+02	4,0354E+02
40,0	-6,5593E+01	3,3851E+02	-5,7845E+02	3,2846E+02

Tabela 6- Levantamento para usina de Três Irmãos, mês de chuva.

Três Irmãos			Abril, Março e Dezembro	
	Mês de chuva			
prof [m]	x=vutil	y= pft		
	Bo	b1	b2	b3
0,0	-5,3611E+00	2,9490E+01	-5,3845E+01	3,3795E+01
20,0	-1,0949E+01	5,9305E+01	-1,0633E+02	6,4292E+01
40,0	-3,7591E+01	2,0635E+02	-3,7563E+02	2,2799E+02

Tabela 7- Levantamento para usina de Três Irmãos, mês de chuva

Três Irmãos			Abril, Março e Dezembro					
	Mês de chuva							
prof [m]	x=pvutil01	Y= (pclor01)+1			x=pft01	y= (pclor01)+1		
	Bo	B1	b2	b3	bo	b1	b2	b3
0,0	6,6455E+01	-3,6380E+02	6,6005E+02	-3,9633E+02	2,6561E+01	-8,4932E+01	8,6863E+01	-2,7757E+05
20,0	5,8528E+01	-3,0922E+02	5,4126E+02	-3,1357E+02	-1,9177E+01	7,2195E+01	-9,0076E+01	3,7391E+01
40,0	3,1829E+01	-1,6500E+02	2,8291E+02	-1,6031E+02	4,4366E+00	-1,7709E+01	2,2235E+01	-8,5977E+00

Tabela 8- Levantamento para usina de Três Irmãos, mês de seca.

Três Irmãos			Junho e Setembro					
	Mês de seca							
prof [m]	X=pvutil01	Y= (pclor01)+1			x=pft01	y= (pclor01)+1		
	Bo	B1	b2	b3	bo	b1	b2	b3
0,0	7,3522E+01	-3,9433E+02	6,9960E+02	-4,0994E+02	-0,0546	-0,1308	0,7057	-0,1996
20,0	7,3940E+01	-3,9364E+02	6,9302E+02	-4,0288E+02	0,241	-0,8005	0,6743	0,1942
40,0	-2,8845E+01	1,4402E+02	-2,3765E+02	1,2975E+02	1,2693	-5,7219	8,4129	-3,8237

Anexo 5

Restrição Operativa das Usinas Simuladas

(fonte: “Inventário das restrições operativas hidráulicas dos aproveitamentos hidrelétricos”, revisão-0 de 2006, **ONS** RE 3/364/2005)

CESP

38 Ilha Solteira

Empresa: CESP
Aproveitamento: Ilha Solteira
Rio: Paraná

38.1 Restrições de jusante

38.1.1 Taxa de variação máxima das defluências

Restrição 1 - a partir de 8000 m³/s recomenda-se que a taxa de variação da vazão defluente não seja superior a 10% da defluência anterior.

38.2 Informações Operativas Relevantes (IOR)

IOR 1 – Vazão Máxima

Para vazões vertidas superiores a 11.500 m³/s o “spray” provocado atinge a SE 440 kV, bay´s UG´s 20 a 17 podendo ocasionar desligamento nos equipamentos atingidos;

39 Três Irmãos

Empresa: CESP
Aproveitamento: Três Irmãos
Rio: Tietê

39.1 Restrições de montante

39.1.1 Nível mínimo

Restrição 1 - enquanto não forem realizadas as obras de derrocamento no leito do rio, no trecho entre Nova Avanhandava e Três Irmãos, o nível mínimo de montante deverá ser de 325,40 m para proporcionar condições de navegabilidade neste trecho. Para níveis menores, são necessários ajustes de defluências na usina de montante.

39.2 Restrições de jusante

39.2.1 Taxa de variação máxima das defluências

Restrição 2 - a partir de 2000 m³/s recomenda-se que a taxa de variação da vazão defluente não seja superior a 10% da defluência anterior.

39.3 Operação especial

Restrição 3 - devido à ocorrência de plantas aquáticas (elódeas) a jusante de Três Irmãos deve-se minimizar os vertimentos nesta usina de forma a diminuir o

deslocamento destas plantas para a UHE Jupia evitando o entupimento nas grades da tomada d'água. Assim, no período chuvoso, recomenda-se a transferência de vazões não turbináveis de Três Irmãos para Ilha Solteira, através do Canal Pereira Barreto. Neste caso o nível de montante de Três Irmãos deverá ser mantido mais alto, considerando-se que o limite de velocidade da água no canal é de 2 m/s para possibilitar a navegação e 4 m/s para manter a estabilidade dos taludes.

40 Jupia

Empresa: CESP
Aproveitamento: Jupia
Rio: Paraná

40.1 Restrições de jusante

40.1.1 Vazões mínimas

Restrição 1 - vazão defluente mínima de 4000 m³/s para evitar a formação de lagoas a jusante que podem aprisionar peixes e assim causar danos a ictiofauna.

40.1.2 Vazões máximas

Restrição 2 - a vazão defluente máxima na UHE Jupia é de 16000 m³/s. Cabe destacar que esta vazão havia sido desativada. Porém, a mesma voltou a vigorar por sugestão da CESP para suprir a impossibilidade dos Agentes envolvidos ratificarem ou retificarem a tempo (para a prevenção de cheias no período 2002/2003) o valor de 24.000 m³/s no posto fluviométrico Porto São José, situado a jusante da foz do rio Paranapanema.

40.1.3 Taxa de variação máxima das defluências

Restrição 3 - para reduzir a defluência de 5000 m³/s para 4000 m³/s deve-se adotar a taxa de variação de 500 m³/s a cada meia hora, para evitar aprisionamento de peixes em lagoas marginais.

Restrição 4 - a partir de 9.000 m³/s recomenda-se que a taxa de variação da vazão defluente não seja superior a 10% da defluência anterior (limitada a 2.000 m³/s).

43 Porto Primavera

Empresa: CESP

Aproveitamento: Porto Primavera

Rio: Paraná

43.1 Restrições de jusante

43.1.1 Vazões máximas

Restrição 1 - restrição na estação fluviométrica Porto São José

A vazão máxima em Porto Primavera é condicionada a uma vazão máxima de 24000 m³/s em Porto São José.

43.1.2 Vazões mínimas

Restrição 2 - danos à ictiofauna

Vazão defluente mínima de 4600 m³/s para evitar a formação de lagoas marginais a jusante que podem aprisionar peixes e assim causar danos à ictiofauna.

Restrição 3 - restrição para navegação (Balsa de Porto Primavera)

Das 5h00 às 24h00 a defluência mínima é de aproximadamente 5500 m³/s para proporcionar condições de navegabilidade transversal (travessia de balsa) no porto imediatamente a jusante da usina.

43.1.3 Taxa de variação máxima das defluências

Restrição 4 - a partir de 10000 m³/s recomenda-se que a taxa de variação da vazão defluente não seja superior a 10% da defluência anterior, exceção feita às situações descritas a seguir, para as quais não há limite para essa taxa:

- situações de emergência;
- situações nas quais a diferença entre as vazões defluentes correspondentes à posição atual e à posição seguinte, calculadas a partir da tabela de vazões vertidas com a lei de manobra normal, seja maior do que 10% da vazão defluente atual.

Referência Bibliográfica

Almeida C. A. et all (2002), Caracterização Ecotoxicológica do Sedimento da Represa do Lobo e seus Tributário; Recursos Hidroenergéticos – usos, impactos e planejamento integrado, vol.1, Série- Ciências da Engenharia Ambiental, São Carlos, RiMa , 2002;

Anuário Exame (2006-2007), Agronegócio, Editora Abril Junho 2006

Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, <http://www.aneel.gov.br>;

Arruda W. C. (2007), Utilização de Software Livre na Reengenharia de um Sistema de apoio ao Planejamento Energético, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2007;

Azevedo S. M. F. (2001), Toxinas de Cianobactérias: Causas e Consequências para a Saúde Pública; Medicina on line 1, número 3, <http://www.medonline.com.br/microcis.htm>, 1998;

Bicudo D. C. et all (1999), Escala de amostragem e variabilidade de fatores limnológicos em reservatório eutrofizado; Cap 14; Henry R. (1999) Ecologia de Reservatórios: Estrutura, Função e Aspectos Sociais; Departamento de Zoologia, Instituto de Biociências, UNESP, Botucatu, SP , 1999;

Bozelli, R. L. & Huszar, V. L. M. (2003), Comunidades Fito e Zooplancônicas Continentais em Tempo de Avaliação; LIMNOtemas; Publicação da Sociedade Brasileira de Limnologia, Maio de 2003;

Brandão J. L. B. (2004), Modelo para operação de sistemas de reservatórios com usos múltiplos; Tese de doutorado, Escola politécnica da Universidade de São Paulo, área de concentração Engenharia Hidráulica, São Paulo 2004;

Calijuri M. C. et all (1999), A Produtividade Primária pelo Fitoplâncton na Represa de Salto Grande, pág. 109-148, In: HENRY R. *Ecologia de Reservatórios: Estrutura, Função e Aspectos Sociais*, FAPESP-FUNDIBIO, 1999;

Calijuri M. C. e Santos A. C. A. (2003), Produção primária da comunidade fitoplantonica em dois reservatórios com diferentes graus de trofia no Estado de São Paulo – Brasil, IV Seminário Internacional de Gestão de Águas, Fortaleza, Brasil;

Carvalho M. C. (2003), Comunidade fitoplanctônica como instrumento de biomonitoramento em reservatórios do Estado de São Paulo; São Paulo (BR); Tese de doutorado – Faculdade de Saúde Pública da USP, 2003;

Câmara de Comercialização de Energia, CCE, <http://www.cce.gov.br>;

Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, CNA, www.cna.org.br;

Cruz Jr, G. (1998), Modelo equivalente não linear para o planejamento da operação a longo prazo de sistemas de energia elétrica; Tese de Doutorado; Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998;

Cunha-Santno et all (2002), Estequiometria da decomposição aeróbica de galhos, cascas, serapilheira e folhas; Recursos Hidroenergéticos – usos, impactos e planejamento integrado, vol.1, Série- Ciências da Engenharia Ambiental, São Carlos, RiMa , 2002;

De Fellipo et all (1999), As Alterações na Qualidade da Água no Enchimento do Reservatório da UHE Serra da Mesa-GO, pág 321-46, In: HENRY R. *Ecologia de Reservatórios: Estrutura, Função e Aspectos Sociais*, FAPESP-FUNDIBIO, 1999;

Espíndola E. L. G. e Leite M. A. (2002), Análise do processo de eutrofização entre os reservatórios de Salto Grande (22°44'S e 47°15'W) e do Lobo (22°10'S e 47°57'W); Recursos Hidroenergéticos – usos, impactos e planejamento integrado, vol.1, Série- Ciências da Engenharia Ambiental, São Carlos, RiMa , 2002;

Espíndola E. L. G. Et all (2002 a), Estudos ecotoxicológicos nos reservatórios em cascata do médio Tietê: Uma avaliação dos impactos ambientais; Recursos Hidroenergéticos – usos, impactos e planejamento integrado, vol.1, Série- Ciências da Engenharia Ambiental, São Carlos, RiMa , 2002;

Espíndola E. L. G. Et all (2002 b), Limnologia dos reservatórios em cascata do médio e baixo rio Tietê: Uma análise espacial e temporal; Recursos Hidroenergéticos – usos, impactos e planejamento integrado, vol.1, Série- Ciências da Engenharia Ambiental, São Carlos, RiMa, 2002;

Esteves, F. A.; Fundamentos de Limnologia, 2^a ed., Editora Interciência, Rio de janeiro 1998, 602p;

Geraldes A. M. e Boavida M. J. (2005), Seasonal water level fluctuations: Implications for reservoir limnology and management; Lakes and Reservoirs: Research and Management 2005, 10:59-69;

Geraldes A. M. e Boavida M. J. (2004), Limnological variations of a reservoir during two successive years; One wet, another dry; Lakes and Reservoirs: Research and Management 2004 9: 143-152;

Ganier J. et all (2005), Nutrient dynamics and control of eutrophication in the Marine River system: modeling the role of exchangeable phosphorous; Journal of hydrology 304 (2005) 397-412;

Hakanson L. et all (2003), Management criteria for lake ecosystems applied to case studies of changes in nutrient loading and climate change; Lakes & Reservoirs: Research and Management 2003, 8:141-155;

Henry R. (1999), Ecologia de Reservatórios: Estrutura, Função e Aspectos Sociais; Departamento de Zoologia, Instituto de Biociências, UNESP, Botucatu, SP , 1999;

Huszar V. L. M. & Silva L. H. S. (1999), A estrutura da comunidade fitoplanctônica no Brasil: cinco décadas de estudos; LIMNOtemas; Publicação da Sociedade Brasileira de Limnologia, Julho de 1999;

Jornal Valor Econômico (2007), Novembro 2007

Kelly M., Grayman W. et all (2004), Water Distribution Systems Handbook; chapters 4 and 9, McGraw-Hill, Digital Engineering Library, 2004;

Mariani C. F. (2006), Reservatório Rio Grande: Caracterização limnológica da água e biodisponibilidade de metais-traço no sedimento; Dissertação de Mestrado em Ciências, na área de Ecologia de Sistemas Terrestres e Aquáticos, Universidade de São Paulo, São Paulo 2006;

Matsuzaki, M.; Mucci J. L. N. (2004), Comunidade Fitoplanctonica de um pesqueiro na cidade de São Paulo; Revista Saúde Pública 2004; 38(5):679-86;

May P. H. et all (2003), Economia do Meio Ambiente – Teoria e Prática, Editora Campus, Rio de Janeiro, Elsevier 2003;

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento, www.conab.gov.br;

Multigeo (2003), Reltec/Multigeo/03063; Programa de Monitoramento Limnológico e de Qualidade da Água – Serra da Mesa-GO, Relatório Final de avaliação (Maio/2001 – Janeiro/2003);

ONS (2007), Operador nacional do Sistema Elétrico; Sítio http://www.ons.org.br/historico/percentual_volume_util.aspx;

EPE (2006) Previsão de Carga dos Sistemas Interligados 2006-2010, Planejamento Anual de operação Energética, Abril 2006, Operador Nacional do Sistema Elétrico;

Pereira C. C. G. F. et all (2002), Alterações tróficas nas espécies de peixes em decorrência da construção de reservatórios em cascata no médio e baixo rio Tiête; Recursos Hidroenergéticos – usos, impactos e planejamento integrado, vol.1, Série- Ciências da Engenharia Ambiental, São Carlos, RiMa , 2002;

Pereira R. H. G. et all (2003), A distribuição do zooplankton nos reservatórios em cascata do sistema Médio e Baixo Tiete e sua relação com o índice de estado trófico do ambiente, IV Seminário Internacional de Gestão de Águas, Fortaleza, Brasil;

Pires A.; Fernandez & Fernandez E.; Bueno J. (2006), Política Energética para o Brasil – Propostas para o crescimento sustentável, editora Nova Fronteira S.A., Rio de Janeiro RJ, 2006, ISBN 85-209-1929-4;

Ramos C. M. (2003), Aproveitamento e Gestão Integrada de Recursos Hídricos; IV Seminário Internacional de Gestão de Águas, Fortaleza, Brasil;

Rosa L. P. et all (2002), Emissões de gases de efeito estufa derivados de reservatórios hidrelétricos; projeto BRA/00/029 – Capacitação do setor elétrico brasileiro em relação à mudança global do clima, Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL, Dezembro 2002;

Ruiz-Verdú A. et all (2005), Use of CHRIS for monitoring water quality in Rosarito reservoir; proceedings of the 3rd ESA CHRIS/Proba workshop, 21-23 March, ESRIN, Frascati, Italy, ESA SP-593, June 2005;

Santos F. V. et all (2003), A comunidade Zooplanctonica como bioindicadora da qualidade das águas de alguns reservatórios de Curitiba, Estado do Paraná, Brasil, IV Seminário Internacional de Gestão de Águas, Fortaleza, Brasil, 2003;

Seplan-GO-Sepin, Balanço Energético do Estado de Goiás – série 1990-2004;

Scientific American (2006), Soluções Alternativas para um Mundo Sustentável, Edição Especial Brasil, Outubro de 2006;

Straskraba M. (1993), Ecotechnological models for reservoir water quality management; Ecological Modelling 74 (1994), 1-38;

Straskraba M. e Tundisi J. G. (2000), Diretrizes para o gerenciamento de lagos, volume 9; Gerenciamento da Qualidade de Represas, São Carlos, ILEC/IIIE 2000;

Tolmasquim, M. T. , coordenador (2004), Alternativas energéticas sustentáveis no Brasil, Rio de Janeiro, Relume Dumar: COPPE CENERGIA, 2004;

Tucci A. et all (2006), Fitoplâncton do lago das garças, São Paulo, Brasil; um reservatório urbano eutrófico; Hoehnea 33(2): 147-175, 2006;

Tufford D. L. e McKellar H. N. (1999), Spatial and temporal hydrodynamic and water quality modeling analysis of a large reservoir on the South Carolina (USA) coastal plain; Ecological Modelling 114 (1999), 137-173;

Tuzun I.; Ince O. (2006), Relationship between water flow volume and in-lake total phosphorous concentrations via dissolved oxygen concentrations and temperature in a warm temperate reservoir: Implications by path analysis; Lakes and Reservoirs: Research and Management 2006 11: 83-96;

Valor Setorial Energia (2007), Modelo Diversificado, A infra-estrutura necessária para o crescimento sustentável;

Velho L. F. M. et all (2003), Abundancia de tecamebas no plâncton de 30 reservatórios do estado do Paraná;

Vinhal, C. D. N. (1994) Sistema de apoio à decisão no planejamento da operação energética de sistemas de energia elétrica; dissertação de mestrado; Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994;

Walker W. e Alan Plumer Associates (2005), Texas Water Conservation Association Development of used-based chlorophyll criteria for recreational uses of reservoirs; Final Report ; June 2005;