



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO.**

**Impactos na Produção de Energia nas Usinas Hidroelétricas
do Rio Tietê em Decorrência do Transporte Hidroviário.**

Wagner Pernias Lopes

Campinas - SP
2011

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO.**

Wagner Pernias Lopes

**Impactos na Produção de Energia nas Usinas Hidroelétricas
do Rio Tietê em Decorrente do Transporte Hidroviário.**

Dissertação apresentada à Comissão de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos Energéticos e Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Luiz Francato

**Campinas - SP
2011**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

L881i Lopes, Wagner Pernias
 Impactos na produção de energia nas usinas
 hidroelétricas do rio Tietê em decorrência do transporte
 hidroviário / Wagner Pernias Lopes. --Campinas, SP:
 [s.n.], 2011.

 Orientador: Alberto Luiz Francato.
 Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
 Urbanismo.

 1. Navegação interior. 2. Hidrovias. 3. Energia
 hidrelétrica. 4. Hidrelétricas. 5. Aproveitamento
 energético. I. Francato, Alberto Luiz. II. Universidade
 Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil,
 Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Impacts on energy production in hydroelectric plants of the
Tiete river as a result of water transport

Palavras-chave em Inglês: Navegation interior, Waterways, Hydropower,
Hydroelectrics, Energy use

Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Frederico Fábio Mauad, Tiago Zenker Gireli

Data da defesa: 28/02/2011

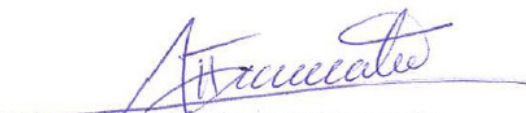
Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

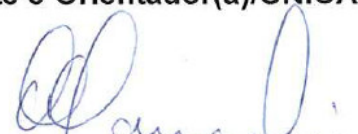
**Impactos na Produção de Energia nas Usinas Hidroelétricas do Rio
Tietê em Decorrência do Transporte Hidroviário.**

Wagner Pernias Lopes

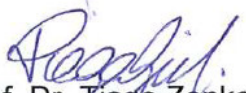
Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



**Prof. Dr. Alberto Luiz Francato
Presidente e Orientador(a)/UNICAMP**



**Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad
EESC/USP**



**Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli
FEC/UNICAMP**

Campinas, 28 de Fevereiro de 2011

Dedicatória

A Deus pela provisão;

*A minha querida esposa Juliana, pelo apoio e
companheirismo irrestrito;*

*Aos meus amados pais: Edelmiro e Ivanice
pelos sólidos princípios de vida, além dos
vários exemplos de superação;*

*Ao meu irmão Marcio, amigo e companheiro
de profissão.*

Agradecimentos

Aos amigos e professores Paulo Sérgio Franco Barbosa e Alberto Luiz Francato (orientador) pela preciosa orientação, paciência e incentivo nos momentos mais difíceis desta jornada.

Ao amigo e professor João Eduardo Gonçalves Lopes pela inestimável contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais professores, amigos e funcionários da Universidade Estadual de Campinas, pela atenção e contribuição na minha formação profissional.

Não poderia deixar de registrar o meu agradecimento especial ao amigo e engenheiro Ítalo de Freitas, por despertar o meu interesse pela área de recursos hídricos, energéticos e ambientais, além de incentivar o meu ingresso na jornada acadêmica.

Meus agradecimentos aos amigos João Carlos Pelicer, Roberto Sattamini, Edwaldo Lippe e Mauricio Nunes, pelo apoio.

A todos os amigos da diretoria de engenharia da AES Tietê pelo incentivo e aprendizado mútuo.

Em especial a empresa AES Tietê, empresa diferenciada no desenvolvimento profissional de seus funcionários.

RESUMO

LOPES, W. P. **Impactos na Produção de Energia nas Usinas Hidroelétricas do Rio Tietê em Decorrencia do Transporte Hidroviário**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil - UNICAMP, 2011. 199 p. Dissertação - Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2011.

A dissertação propõe a utilização de metodologias de otimização e simulação para avaliação de impactos energéticos para uma cascata de aproveitamento múltiplo (navegação e geração hidrelétrica), considerando-se diversos cenários de crescimento setoriais e incertezas hidrológicas. A eficiência dos segmentos de transporte e energia é fundamental para o desempenho competitivo em um ambiente de economia globalizada. Países em desenvolvimento de dimensões continentais como a República Popular da China, Índia e Federação Russa têm apresentado elevadas taxas de crescimento econômico, subsidiadas por intensos investimentos nos setores de transporte e energia. O Brasil utiliza pouco o seu potencial natural para a navegação de interior. As poucas instalações existentes, com o propósito de uso múltiplo estão subutilizadas para navegação. Neste cenário, o Brasil, através de políticas setoriais de investimentos tem fomentado o desenvolvimento dos setores de infra-estrutura, principalmente o de transporte e energia. Neste contexto, a dissertação apresenta os resultados obtidos com aplicação da metodologia de otimização e simulação em um estudo de caso para a cascata do rio Tietê. A metodologia para avaliação de impactos proposta nesta dissertação apresenta grande relevância para os setores de energia e transportes, além de trazer contribuição científica para análise integrada de problemas em modelos de simulação e otimização.

Palavras-chave: Navegação Interior, Hidrovias, Energia Hidrelétrica, Hidrelétricas, Aproveitamento Energético.

ABSTRACT

LOPES, W. P. **Impacts on Energy Production in Hydroelectric Plants of the Tiete River as a result of Water Transport**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil - UNICAMP, 2011. 199p. Thesis - Civil Engineering Faculty, UNICAMP, 2011.

The paper proposed the use of optimization and simulation methodologies for assessing impacts on energy production in a cascade of multiple use (navigation and hydropower generation) for various scenarios of sectoral growth and hydrological uncertainties. The efficiency of transport and energy sectors is important to the competitive performance of a country in an environment of a global economy. Developing countries with large continental dimensions, such as Popular Republic of China, India and Russia, have presented high rates of economic growth, which is subsidized by heavy investments in transport and energy. Brazil makes little use of its great natural potential for inland navigation. The few facilities established with the purpose of multiple use are underutilized for navigation. In this scenario, Brazil, through local policies and investment programs, has encouraged the development of the sectors of infrastructure, particularly for transportation and energy. In this context, this dissertation presents the methodology and the results obtained from a case study of a stretch of the Tietê river. The methodology for impact assessment proposed in this thesis is highly relevant to the sectors of energy and transport, besides bringing scientific contribution to the integrated analysis of problems related to simulation models and optimization.

Keywords: Navegation interior, Waterways, Hydropower, Hydroelectrics, Energy use

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - Perfil Esquemático de Geração de Energia Hidrelétrica.....	34
FIGURA 3.2 - Distribuição de Volumes em um Reservatório.....	33
FIGURA 3.3 - Consumo de Energia Elétrica entre as Regiões Brasileiras.....	41
FIGURA 3.4 - Estrutura Institucional do Setor Elétrico Brasileiro.....	43
FIGURA 3.5 - Integração Eletroenergética no Brasil.....	46
FIGURA 3.6 - ENA-MLT (MWmed) para os Sub-Sistemas brasileiros.....	49
FIGURA 3.7 - ENA-MLT (MWmed) para Bacia do Rio Tietê.....	50
FIGURA 3.8 - Comparação entre modais - capacidade e carga 01.....	54
FIGURA 3.9 - Comparação entre modais - capacidade e carga 02.....	55
FIGURA 3.10 - Consumo comparativo de combustível.....	56
FIGURA 3.11 - Comparação entre modais quanto a emissão Co2.....	57
FIGURA 3.12 - Extensão de vias navegáveis no mundo.....	58
FIGURA 3.13 - Localização das hidrovias Norte-Americanas.....	59
FIGURA 3.14 – Perfil de carga transportada pelas Hidrovias Norte-Americanas.....	60
FIGURA 3.15 - Transporte anual de cargas pelas Hidrovias Norte-Americanas.....	60
FIGURA 3.16 - Crescimento da malha Hidroviária Européia.....	62
FIGURA 3.17 - Transporte anual de cargas pelas Hidrovias Européias.....	62
FIGURA 3.18 - Mapa Hidroviário União Européia	63
FIGURA 3.19 - Diagrama da malha Hidroviária Européia.....	65
FIGURA 3.20 - Mapa político da Federação da Rússia.....	66
FIGURA 3.21 - Principais Hidrovias Russas.....	67
FIGURA 3.22 - Transporte anual de cargas pelas Hidrovias Russas.....	68
FIGURA 3.23 - Mapa político e hidrografia na Republica Popular da China.....	70
FIGURA 3.24 - Crescimento da malha hidroviária na Republica Popular da China.....	72
FIGURA 3.25 - Transporte anual de cargas (ton) pelas hidrovias da Republica Popular da China.....	72

FIGURA 3.26 - Transporte anual de cargas (TkU) pelas hidrovias da Republica Popular da China.....	73
FIGURA 3.27 - Transporte anual de cargas (ton) pelas hidrovias da Índia.....	74
FIGURA 3.28 - Transporte anual de cargas (TkU) pelas hidrovias da Índia.....	75
FIGURA 3.29 - Mapa de Localização das Hidrovias da Índia.....	75
FIGURA 3.30 - Hidrovias do Brasil.....	77
FIGURA 3.31 - Administrações Hidroviárias no Brasil.....	83
FIGURA 3.32 - Plano para desenvolvimento e equilíbrio modal.....	84
FIGURA 3.33 - Plano de Investimentos no setor hidroviário.....	85
FIGURA 3.34 - Classificação das Eclusas de Navegação.....	86
FIGURA 3.35 - Classificação dos Ascensores das Embarcações.....	87
FIGURA 3.36 - Projeto de uma Porta de Eclusa – Leonardo da Vinci.....	88
FIGURA 3.37 - Lay-Out de uma Eclusa simples.....	90
FIGURA 4.1 - Mapa da Hidrovia Tietê-Paraná.....	100
FIGURA 4.2 - Configuração de Comboio Tipo Paraná - 3 x 2 Chatas.....	102
FIGURA 4.3 - Configuração de Comboio Tipo Tietê - 2 x 1 Chata.....	102
FIGURA 4.4 - Restrições de Navegabilidade – Hidrovia Tietê-Paraná.....	103
FIGURA 4.5 - Eclusa de Barra Bonita – Rio Tietê.....	105
FIGURA 4.6 - Eclusa de Bariri – Rio Tietê.....	105
FIGURA 4.7 - Eclusa de Ibitinga – Rio Tietê.....	106
FIGURA 4.8 - Eclusa de Promissão – Rio Tietê.....	106
FIGURA 4.9 - Eclusa de Nova Avanhandava – Rio Tietê.....	107
FIGURA 4.10 - Eclusa de Três Irmãos – Rio Tietê.....	107
FIGURA 4.11 - Eclusa de Jupia – Rio Paraná.....	108
FIGURA 4.12 - Eclusa de Porto Primavera – Rio Paraná.....	108
FIGURA 4.13 - Canal de Pereira Barreto.....	109
FIGURA 4.14 - Transporte anual de cargas (ton) pela hidrovia Tietê-Paraná.....	112
FIGURA 4.15 - Transporte anual de cargas (TkU) pela hidrovia Tietê-Paraná.....	112
FIGURA 4.16 - Principais Commodities Transportadas em toneladas.....	113
FIGURA 4.17 - Principais Commodities Transportadas em TkU.....	114
FIGURA 4.18 - Expectativa de crescimento versus verificado na Hidrovia Tietê-Paraná.....	116
FIGURA 5.1 - Tela de Interface do SolverAES_Hidrovia – Módulo Solver.....	118
FIGURA 5.2 - Tela de Interface do SolverAES_Hidrovia – Módulo Hidrovia.....	119
FIGURA 5.3 - Tela de Interface do SolverAES_Hidrovia – Módulo Solver Resultados.....	119

FIGURA 5.4 - Topologia da Cascata do Rio Tietê.....	122
FIGURA 5.5 - Representação Matemática – Sistema de usinas do Rio Tietê.....	124
FIGURA 5.6 - Representação das variáveis envolvidas nos processos de geração e eclusagem.....	125
FIGURA 5.7 - Mapeamento da infraestrutura física (portos) – Hidrovia Tietê-Paraná.....	141
FIGURA 5.8 - Capacidade das Eclusas versus simulação de demanda (taxa de crescimento de 10% ao ano).....	146
FIGURA 5.9 - Capacidade das Eclusas versus simulação de demanda (taxa de crescimento de 15% ao ano).....	147
FIGURA 5.10 - Capacidade das Eclusas versus simulação de demanda (taxa de crescimento de 26,5% ao ano).....	148
FIGURA 5.11 - Curvas de envoltória de demanda para as eclusas - Capacidade versus taxas de crescimento.....	149
FIGURA 5.12 - Perfil de repartição de quedas para Cascata do Rio Tietê.....	154
FIGURA 5.13 - Diagrama combinatório de cenários.....	157
FIGURA 6.1 - Cenário Hidrológico Úmido (3º Quartil -118% MLT) – 2011/2012.....	162
FIGURA 6.2 - Cenário Hidrológico Normal (Mediana 93% MLT) – 2011/2012.....	163
FIGURA 6.3 - Cenário Hidrológico Seco (Mediana -73% MLT) – 2011/2012.....	164
FIGURA 6.4 - Cenário Hidrológico Muito Seco (5º Percentil - 58% MLT) – 2011/2012.....	165
FIGURA 6.5 - Cenário Hidrológico Úmido (3º Quartil -118% MLT) – 2015/2016.....	166
FIGURA 6.6 - Cenário Hidrológico Normal (Mediana -93% MLT) – 2015/2016.....	167
FIGURA 6.7 - Cenário Hidrológico Seco (Mediana -73% MLT) – 2015/2016.....	168
FIGURA 6.8 - Cenário Hidrológico Muito Seco (5º Percentil - 58% MLT) – 2015/2016.....	169
FIGURA 6.9 - Cenário Hidrológico Úmido (3º Quartil -118% MLT) – 2019/2020.....	170
FIGURA 6.10 - Cenário Hidrológico Normal (Mediana -93% MLT) – 2019/2020.....	171
FIGURA 6.11 - Cenário Hidrológico Seco (Mediana -73% MLT) – 2019/2020.....	172
FIGURA 6.12 - Cenário Hidrológico Muito Seco (5º Percentil - 58% MLT) – 2019/2020.....	173
FIGURA 7.1 - Produção Tietê versus Cenário Hidrológicos.....	179
FIGURA 7.2 - Produção Tietê – Cenário Úmido.....	180
FIGURA 7.3 - Produção Tietê – Cenário Normal.....	181
FIGURA 7.4 - Produção Tietê – Cenário Seco.....	182
FIGURA 7.5 - Produção Tietê – Cenário Muito Seco.....	183
FIGURA 7.6 - Consumo energético pelo sistema hidroviário.....	186

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Distribuição de Água na Terra.....	30
TABELA 3.2 - Principais Barragens da Antiguidade.....	32
TABELA 3.3 - Consumo de energia no mundo.....	39
TABELA 3.4 - Distribuição do Consumo de Energia no Brasil.....	40
TABELA 3.5 - Crescimento da Oferta de Energia, População e PIB.....	42
TABELA 3.6 - Participação de cada modal no transporte de vários países.....	53
TABELA 3.7 - Custo referencial de implantação de via.....	54
TABELA 3.8 - Movimentação de cargas Hidrovias Brasileiras.....	78
TABELA 3.9 - Tabela Resumo – Principais Hidrovias no Mundo.....	79
TABELA 3.10 - Investimento em transporte recomendado pelo PNLT.....	84
TABELA 3.11 - Coeficiente de Eficiência das Hidrovias da EU e EUA.....	93
TABELA 4.1 - Frota de embarcações atuante na hidrovia Tietê-Paraná.....	101
TABELA 4.2 - Características Técnicas das Eclusas Hidrovia Tietê -Paraná.....	104
TABELA 4.3 - Capacidade Máxima e Efetiva de Carga para as Eclusas do rio Tietê.....	110
TABELA 4.4 - Melhorias Operacionais Hidrovia Tietê-Paraná.....	112
TABELA 5.1 - Níveis Operacionais para navegação.....	136
TABELA 5.2 - Número de operações por eclusa.....	138
TABELA 5.3 - Volume de cargas movimentadas por eclusa (Toneladas).....	138
TABELA 5.4 - Principais cargas transportadas pela Hidrovia Tietê-Paraná (2007-2008).....	139
TABELA 5.5 - Contribuição (média histórica) das cargas nas operações das eclusas da AES Tietê.....	139
TABELA 5.6 - Distância Média de Transporte (DTM).....	140
TABELA 5.7 – Eficiência operacional média por operação (toneladas/operação).....	142
TABELA 5.8 - Participação mensal do volume anual de cargas das eclusas.....	142
TABELA 5.9 - Número de operações – Simulação taxa de crescimento de 10% ao ano.....	150
TABELA 5.10 - Número de operações – Simulação taxa de crescimento de 15% ao ano.....	151

TABELA 5.11 - Número de operações – Simulação taxa de crescimento de 26,5% ao ano.....	151
TABELA 5.12 – Série Estatística de Vazões Naturais – ONS (2009).....	153
TABELA 5.13 – Controle de cheias ONS – % Volume do Reservatório.....	154
TABELA 5.14 – Características técnicas Usinas Hidrelétricas AES Tietê.....	155
TABELA 5.15 - Cenários simulados.....	158
TABELA 6.1 - Resultados da simulação – 2010/2011.....	160
TABELA 6.2 - Resultados da simulação – 2015/2016.....	160
TABELA 6.3 - Resultados da simulação – 2019/2020.....	160
TABELA 6.4 - Período de restrição ao tráfego hidroviário – 2011/2012.....	175
TABELA 6.5 - Período de restrição ao tráfego hidroviário – 2015/2016.....	176
TABELA 6.6 - Período de restrição ao tráfego hidroviário – 2019/2020.....	177
TABELA 7.1 – Tabela resumo das interrupções do tráfego hidroviário.....	186

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%$	- Percentual
MW	- Milhões de Watts
km	- Quilômetro
km^3	- Quilômetro Cúbico
eh_i	- Energia produzida na usina hidroelétrica i ao longo de um período
ep_i	- Energia potencial da massa de água que é usada para acionar as turbinas na usina hidroelétrica i ao longo de um período de tempo considerado
rt_i	- Rendimento da turbina da usina hidroelétrica i
rg_i	- Rendimento do gerador da usina hidroelétrica i
TWh	- Trilhões de Watts hora
$Mtep$	- Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
L	- Litros
d	- Dia
bbl	- Barril
hab	- Habitante
$US\$$	- Dólar Americano (moeda)
Δ	- Variação
GWh	- Bilhões de Watts hora
kV	- Mil Volts
med	- Média
ton	- Tonelada (1000 kg)
g	- Grama
km^2	- Quilômetro Quadrado
$R\$$	- Real Brasileiro (moeda)
N	- Número Máximo de transposições previstas por ano

$\bar{T}$	- Tempo médio de Transposição (em minutos);
CM	- Capacidade Máxima de Tráfego
W	- Capacidade de Carga de cada embarcação
W_{ec}	- Capacidade de Carga da Eclusa
T_t	- Tempo Total de Eclusagem
T_1	- Tempo de Acesso a Câmara
T_2	- Tempo de Fechamento da Porta
T_3	- Tempo de Deslocamento Vertical
T_4	- Tempo de Abertura da Porta de Saída
T_5	- Tempo da saída da estrutura de transposição
E	- Coeficiente Efetivo de Utilização
E_1	- Coeficientes relativos ao tempo real que a estrutura é operada
E_2	- Coeficiente de eficiência relativo ao tempo de transposição
E_3	- Coeficiente de eficiência relativo ao aproveitamento da área da câmara
E_4	- Coeficiente de eficiência relativo à capacidade de carga
G_{at}	- Consumo máximo de água teórico
V	- Volume máximo d' água necessário para encher a câmara
k	- Coeficiente
α	- Representa o coeficiente de passagens pela câmara
D_1	- Irregularidades do fluxo de embarcações
D_2	- Volume efetivo de cada eclusagem
HP	- Unidade de Potência (Cavalo-Vapor)
QV	- Vazão Vertida
QT	- Vazão Turbinada
QEc	- Vazão equivalente de eclusagem
QAf	- Vazão Afluente
QEv	- Vazão proveniente de evaporação do reservatório
QCo	- Vazão de uso consuntivo
t	- Índice de tempo
P	- Produção de energia (MWmédio)

n_T	-	Rendimento global do conjunto turbina, gerador e circuito hidráulico (adimensional)
n_g	-	Rendimento do gerador (adimensional)
n_t	-	Rendimento da turbina (adimensional)
n_H	-	Rendimento do circuito hidráulico (adimensional)
Hb	-	Queda bruta (m), diferença entre o Nível de Montante (Nm) e Jusante (Nj)
Ar	-	Área da Câmara da Eclusa (m ²)
nd	-	Número de dias no mês (adimensional)
kd	-	Constante de transformação de tempo - dias em segundos (s)
Nm	-	Nível de Montante (m)
Nj	-	Nível de Jusante (m)
S	-	Armazenamento (m ³)
ξ	-	Produtibilidade
D	-	Demanda superior a capacidade do sistema (MW)
i	-	Índice do Reservatório
t	-	Índice do Mês
n	-	Índice indicativo da quantidade de reservatórios de um sistema
m	-	Índice de tempo de um sistema de reservatórios
ID	-	Índice de disponibilidade de uma usina
k	-	Índice de usina à montante da usina i
a	-	Coeficiente Polinomial (Montante)
b	-	Coeficiente Polinomial (Jusante)
T_a	-	Taxa de crescimento anual (Demanda Hidroviária)
Em_i	-	Rendimento médio operacional de uma eclusa (ton/operação)
$Part_{com.}$	-	Participação percentual de uma commodity no volume de cargas anual de uma eclusa

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRH	- Associação Brasileira de Recursos Hídricos
ACL	- Ambiente de Contratação Livre
ACR	- Ambiente de Contratação Regulado
AES Tietê S.A.	- Empresa Concessionária de Geração de Energia Elétrica
AGN	- Rede de Vias Navegáveis de Importância Internacional
AHIMOC	- Administração Hidroviária da Amazônia Ocidental
AHINOR	- Administração Hidroviária do Nordeste
AHIPAR	- Administração Hidroviária do Paraguai
AHITAR	- Administração Hidroviária do Tocantins/Araguaia
AHSFRA	- Administração Hidroviária do São Francisco
AHSUL	- Administração Hidroviária do Sul
AHRANA	- Administração Hidroviária do Rio Paraná
ALL	- América Latina Logística
ANA	- Agência Nacional de Águas
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	- Agência Nacional do Petróleo
ANTAQ	- Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANTT	- Agência Nacional de Transportes Terrestre
BE	- Bélgica
BIG	- Banco de Informação da Geração - ONS
BNDS	- Banco Nacional de Desenvolvimento
BRICs	- Grupo de países formados Brasil, Federação da Rússia, Índia e República Popular da China.
BU	- Bulgária
C	- Consumidores Livres
CADE	- Conselho Administrativo de Defesa Econômica

CBDB	- Comitê Brasileiro de Barragens
CCEE	- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CESP	- Companhia Energética de São Paulo
CET	- Comunidade de Estados Independentes
CETTRAN	- Centro de Excelência em Engenharia de Transporte
CMP	- Capacidade Efetiva de Tráfego
CMT	- Capacidade Máxima de Tráfego
CNPE	- Conselho Nacional de Política Energética
CONAMA	- Conselho Nacional do meio Ambiente
CONIT	- Conselho Nacional de Integração de Política de Transporte
CU	- Capacidade de Utilização
CY	- Chipre
CZ	- Republica Checa
D	- Agente de Distribuição
DE	- Alemanha
DECOMP	- Modelo para Otimização da Operação de Curto Prazo
DH	- Departamento Hidroviário do Estado de São Paulo
DK	- Dinamarca
DNIT	- Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
DNPVN	- Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis
EAR	- Energia elétrica armazenada em um reservatório
ENA	- Energia natural gerada a partir de uma vazão natural
EE	- Estônia
EL	- Grécia
EMAE	- Empresa Metropolitana de Águas e Energia S/A
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
EPC	- Equipamento de Proteção Coletiva
EPI	- Equipamento de Proteção Individual
ES	- Espanha
ESCAP	- Economic and Social Commission for Ásia and the Pacific
EU	- União Européia
FI	- Finlândia

FR	- França
G	- Agente de Geração
GAMS	- General Algebraic Modeling System
GCOI	- Grupo Coordenador para Operação Interligada
HU	- Hungria
IBGE	- Empresa Brasileira de Geografia e Estatística
IE	- Irlanda
INE	- Inland Navigation Europe
IT	- Itália
IWAI	- Autoridade da Índia para Navegação de Interiores
LCEC	- Laboratório Central de Engenharia Civil
LT	- Lituânia
LU	- Luxemburgo
LV	- Latvia
MAE	- Mercado Atacadista de Energia
MJ	- Ministério da Justiça
MLT	- Média de Longo Termo
MME	- Ministério das Minas e Energia
MT	- Malta
NAIDES	- Programa Europeu de Ação Integrada para Transporte
NEWAVE	- Modelo de Otimização da Operação de Curto Prazo
NL	- Holanda
NRSP	- Núcleo Regional de São Paulo - CBDB
NW	- Via de Navegação Indiana
NWF	- National Waterways Foundation
ONS	- Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	- Organização das Nações Unidas
PCH	- Pequena Central Hidrelétrica
PDDE	- Programação Dinâmica Dual Estocástica
PL	- Polônia
PIB	- Produto Interno Bruto
PNLT	- Plano Nacional de Logística e Transporte

PORTOBRÀS	-	Empresa de Portos do Brasil
PT	-	Portugal
REPLAN	-	Refinaria do Planalto Paulista
RO	-	Romênia
SE	-	Suécia
SI	-	Eslovênia
SIN	-	Sistema Interligado Nacional
SNRH	-	Sistema nacional de Recursos Hídricos
ST	-	Secretaria de Estado dos Transportes
SK	-	República da Eslováquia
SP	-	Estado de São Paulo
T	-	Agente de Transmissão
TkU	-	Toneladas por Quilômetro Útil
UDWS	-	Unified Deep Water Sistem of Russia
USCAE	-	US Army Corps of Engineers
UNECE	-	United Nations Economic Commission for Europe
URSS	-	União das Republicas Socialistas Soviéticas
UHE	-	Usina Hidroelétrica
USA	-	Estados Unidos da América

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xvi
SUMÁRIO.....	xx
1. Introdução.....	23
2. Objetivos.....	27
2.1. Objetivos Gerais.....	27
2.2. Objetivos Específicos.....	27
3. Revisão Bibliográfica.....	29
3.1. Recurso Hídrico.....	29
3.2. Barragem e Reservatórios.....	31
3.3. Aproveitamento Hidrelétrico.....	33
3.3.1. Estruturas de uma Usina Hidrelétrica.....	35
3.3.2. Dimensionamento de Reservatórios.....	37
3.4. A Energia no Mundo.....	39
3.4.1. A Energia no Brasil.....	40
3.4.2. A Estrutura Institucional do Setor Elétrico Brasileiro.....	42
3.4.3. Sistema Interligado Nacional.....	45
3.4.4. Operação Hidroenergética do SIN.....	46
3.4.5. Hidrologia.....	48
3.5. A Navegação de Interiores.....	50
3.5.1. A História da Navegação de Interior.....	51
3.5.2. Análise comparativa entre modais de transporte.....	53

3.5.3. A Navegação de Interior no Mundo.....	57
3.5.4. A Navegação de Interior nos Estados Unidos da América.....	58
3.5.5. A Navegação de Interior na União Européia.....	61
3.5.6. A Navegação de Interior na Federação Russa.....	66
3.5.7. A Navegação de Interior na Republica Popular da China.....	70
3.5.8. A Navegação de Interior na Índia.....	73
3.5.9. A Navegação de Interior no Brasil.....	76
3.5.10. A Gestão da Navegação no Brasil.....	80
3.5.11. Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT).....	83
3.6. Estruturas de Transposição de Desnível.....	85
3.6.1. Estruturas de Transposição Hidráulica (Eclusas).....	87
3.6.2. Capacidade de Tráfego em Eclusa.....	90
3.6.3. Consumo de água na operação das eclusas.....	94
3.7. Modelo de Otimização e Simulação em Recursos Hídricos.....	96
3.7.1. Estado da Arte.....	96
4. Estudo de Caso.....	99
4.1. A Hidrovia Tietê-Paraná – Cascata do Rio Tietê.....	99
4.2. Eclusas, Usinas e Canais.....	104
4.2.1. Capacidade de Tráfego das Eclusas.....	109
4.2.2. Movimentação de Cargas.....	110
4.2.3. Previsões de Crescimento.....	115
5. Método.....	117
5.1. Programa de Otimização e Simulação.....	117
5.2. Topologia do sistema.....	120
5.3. Representação Matemática.....	123
5.4. Equacionamentos.....	124
5.4.1. Função Objetivo.....	128
5.4.2. Conjunto de Restrições.....	130
5.4.3. Polinômios de montante e jusante.....	133
5.4.4. Índice de disponibilidade de Geração (ID).....	134
5.4.5. Cenários hidroviários.....	135
5.4.6. Cenários Hidrológicos.....	152

5.5.	Usinas Hidrelétricas – AES Tietê S.A.....	154
5.6.	Simulações.....	157
6.	Resultados.....	159
7.	Análise dos Resultados.....	179
8.	Conclusões.....	187

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Introdução

Nas últimas décadas foram significativas as mudanças observadas na economia mundial. O processo de globalização da economia em decorrência da abertura do mercado internacional tem resultado em ambientes extremamente competitivos para os setores produtivos da economia de um país. Neste cenário de alta competitividade, a sobrevivência de setores da economia depende de ações para redução de custos, eficiência e produtividade. Os setores de energia e transporte desempenham importante papel neste cenário. A energia como um dos insumos principais da cadeia produtiva contribui diretamente para a composição dos custos de produção de um produto ou serviço. Da mesma forma, o transporte eficiente contribui para redução de custos no setor produtivo, garantindo vantagens estratégicas de mercado.

Neste cenário consolida-se uma tendência estratégica de incentivo e desenvolvimento dos segmentos de transporte e energia. A atual conjuntura econômica global esta favorecendo o crescimento econômico de diversos países em desenvolvimento, principalmente os países do grupo denominado “BRICs”, composto pelo Brasil, República Popular da China, Índia e a Federação Russa.

Sob o aspecto da produção energética, o sistema energético brasileiro caracteriza-se por ser um sistema hidrotérmico.

A geração de energia elétrica possui uma preponderância pela produção hidroelétrica. Esta preferência esta associada à grande disponibilidade hídrica existente e aos baixos custos de produção desta matriz.

O sistema elétrico brasileiro possui uma potência instalada na ordem de 106,215 mil MW (EPE, 2010), deste total, 76,9% são de origem hidroelétrica. Segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energética - BEN 2010), o Brasil possui 260 mil MW de potencial de energia hidráulica para ser explorado, sendo um dos maiores potenciais de geração hidráulica do mundo.

O setor de transporte brasileiro possui uma preponderância pelo modal de transporte rodoviário em detrimento do ferroviário e hidroviário. O transporte rodoviário brasileiro, segundo o Plano Nacional de Logística e Transporte de 2007, responde por 58 % de todo volume de carga transportada no país, seguido pelos modais ferroviário, com 25% e hidroviário com 13% (PNLT, 2007).

Pelas dimensões físicas e características sócio-econômicas do estado brasileiro, a distribuição atual da matriz de transporte apresenta-se desequilibrada e altamente onerosa para o setor produtivo, elevando os custos de produção e reduzindo a competitividade da produção brasileira.

Nos países desenvolvidos observa-se uma melhor distribuição e integração entre os modais de transporte. Mesmo em países em desenvolvimento, com características geográficas parecidas com o Brasil, como a República Popular da China e a Federação Russa, possuem uma melhor distribuição da matriz de transporte. Uma adequada distribuição entre os modais de transporte deve estar associada a uma boa infraestrutura de integração, para possibilitar ganhos de eficiência e competitividade.

Neste sentido foi desenvolvido pelo Ministério dos Transportes e da Defesa o Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT, 2007), como objetivo subsidiar o planejamento de investimentos para o setor de transporte para um período de médio e longo prazo. O Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT) recomenda através de estudos estratégicos o montante de investimento necessário para o setor até 2025, buscando maior equilíbrio entre os modais de transporte, atendimento às necessidades

econômicas, sociais e ambientais numa abordagem globalizada e auto-sustentável. A meta propostas pelos estudos do PNLT é a redução da participação dos atuais 58% do modal rodoviário para 33%, e a elevação da participação do modal ferroviário para 32% e 29% para o aquaviário.

O Brasil é um país privilegiado em recursos hídricos. Segundo levantamento da ANTAQ, a rede hidrográfica nacional possui aproximadamente 44.000 km de extensão, destes 29.000 km são naturalmente navegáveis. Atualmente apenas 13.000 km são explorados de forma intensa e com propósitos comerciais. A expansão deste modal de transporte necessita de investimentos em infra-estrutura básica, como a construção de obras de transposição desnível, obras de dragagem, infra-estrutura portuária, canais para transposição de bacias, etc.

O planejamento de investimento de médio e longo prazo do Brasil no transporte hidroviário, apesar de modestos, apresenta a relevância do tema para o desenvolvimento econômico do país. A Hidrovia Tietê-Paraná está vivenciando um crescimento acelerado, acima do projetado pela Secretaria de Transporte do Estado de São Paulo (STSP-2008), para no transporte de cargas. Em 2008 foi verificado um crescimento de 6,0% (ST-SP-2008), superando a taxa de crescimento prevista em 2004.

Diversos estudos estratégicos conduzem para ampliação da integração da hidrovia Tietê-Paraná com outros modais de transporte, com objetivo de ampliar a capacidade e diversidade de cargas transportadas. Neste contexto citamos a parceria entre a Secretária de Transportes do Estado de São Paulo e a TRANSPETRO para realização de estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental para a implantação de um álcoolduto entre o terminal de Conchas e a REPLAN em Paulínia.

Segundo o Balanço Anual dos Transportes do Estado de São Paulo (2008), a implantação deste álcoolduto além do transporte de álcool pela hidrovia, viabilizará a distribuição em sentido inverso de derivados de petróleo para a região centro-oeste.

Neste contexto observa-se um potencial crescimento de demanda para o setor hidroviário para cenários de curto e médio prazo. Outro aspecto importante é a alteração do perfil de carga atualmente transportada na hidrovia Tietê-Paraná. Atualmente a hidrovia é demandada pelo transporte de commodities agrícolas, com picos de demanda coincidindo com período hidrológico úmido. Esta alteração do perfil de carga deverá homogeneizar os picos de demanda da hidrovia.

2. Objetivos

2.1. Objetivos Gerais

A expectativa de crescimento da demanda por energia elétrica e do crescimento do transporte hidroviário, sugere à inevitável questão da concorrência entre os segmentos, por utilizarem o mesmo recurso hídrico. Neste cenário adiciona-se o componente hidrológico, com toda incerteza e variabilidade que estão sujeitos os recursos hídricos.

Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo matemático de simulação e otimização capaz de simular os impactos energéticos em um ambiente de uso múltiplo (navegação e geração hidroelétrica), considerando os possíveis cenários de crescimento setoriais e de incertezas hidrológicas.

2.2. Objetivos Específicos

Os estudos para desenvolvimento do modelo de otimização e simulação para avaliação dos impactos energéticos em uma cascata de uso múltiplo, resultaram na geração de diversos subprodutos para atendimento a objetivos específicos do trabalho.

Os principais objetivos específicos gerados pelo estudo estão apresentados na seqüência:

- Revisão do cenário atual da navegação de interior nas principais hidrovias do mundo, destacando-se as características técnicas e estratégicas.
- Revisão do cenário atual da navegação de interior no Brasil, abordando aspectos técnicos, institucionais e estratégicos em inserção ao contexto mundial;
- Revisão bibliográfica sobre estruturas de transposição de desnível hidráulicas (eclusas), com detalhamento dos principais parâmetros técnicos utilizados para dimensionamento da capacidade de tráfego em uma hidrovia.
- Estudo técnico-operacional das características e desempenho das eclusas da hidrovia Tietê-Paraná, considerando o perfil de carga movimentada, frota operante, restrições técnicas-operacionais, transportes regionais e demais condições específicas.
- Desenvolvimento de um simulador de demanda para determinação do número de operações declusagens em função de cenários de crescimento;
- Elaboração de diagramas de envoltória de saturação da capacidade efetiva em função de taxas de crescimento para as eclusas da hidrovia Tietê;
- Estudo estatístico das séries de vazões naturais para cascata do rio Tietê, para determinação dos cenários hidrológicos a serem simulados.
- Determinação dos períodos de interrupção do tráfego hidroviário em decorrência da priorização da geração em detrimento a navegação para atendimento de contingências energéticas.
- Determinação do percentual energético absorvido pela hidrovia na cascata do rio Tietê em decorrência do crescimento da demanda hidroviária para horizonte de 2011, 15 e 20;

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Recurso Hídrico.

A água caracteriza-se como elemento fundamental à manutenção da vida e existência das civilizações. Sem ela seria impossível a organização da sociedade e a manutenção do equilíbrio com o meio ambiente.

Estima-se que, atualmente, mais de 1 bilhão de pessoas vivem em condições insuficientes de disponibilidade de água para consumo e que, em 25 anos, cerca de 5,5 bilhões de pessoas estarão vivendo em áreas com moderada ou séria falta de água (ANA, 2007). Quando se analisa o problema de maneira global, observa-se que existe quantidade de água suficiente para o atendimento de toda a população. No entanto, a distribuição não uniforme dos recursos hídricos e da população sobre o planeta acaba por gerar cenários adversos quanto à disponibilidade hídrica em diferentes regiões (Setti et al. apud. Shiklomanov, 1999).

A quantidade de água existente no planeta Terra é de aproximadamente 1.386 milhões de km³. Este volume tem se mantido praticamente constante nos últimos 500 milhões anos (Setti et al. apud. Shiklomanov, 1999). Apesar da grande quantidade de água existente, a sua distribuição e armazenamento na natureza restringem sua utilização direta para diversas finalidades.

Conforme apresentado por (Setti et al. apud. Shiklomanov, 1999), aproximadamente 97,5% do volume total de água disponível no planeta Terra são de água salgada, formadas principalmente pelos oceanos, restam apenas 2,5% do total do recurso em água doce. Ressalta-se que a maior parte dessa água doce (68,7%) está armazenada nas calotas polares e geleiras. A forma de armazenamento em que estes recursos estão mais acessíveis ao uso pelos seres humanos e aos ecossistemas é a água doce, contida em lagos e rios. Este armazenamento de água doce em rios e lagos correspondem a apenas 0,27% do volume total de água doce e cerca de 0,007% do volume total de água disponível na Terra. A Tabela 3.1 apresenta a distribuição deste recurso de forma estratificada entre os vários tipos de reservatórios existentes no planeta.

TABELA 3.1 - Distribuição de Água na Terra (Shiklomanov, 1999).

Reservatórios	Água Salgada		Água Doce		
	Volume (10 ³ km ³)	% do Volume Total	Volume (10 ³ km ³)	% do Volume Total	% do Volume de Água Doce Total
Oceanos	1.338.000,00	96, 5379	-	-	-
Água Congelada	-	-	24.064,00	1, 7362	68, 6971
Solo Congelado	-	-	300	0, 0216	0, 8564
Subsolo	12.870,00	0, 9286	10.530,00	0, 7597	30, 0607
Lagos	85,4	0, 0062	91	0, 0066	0, 2598
Pântanos	-	-	11,5	0, 0008	0, 0328
Rios	-	-	2,1	0, 0002	0, 0061
Biomassa	-	-	1,1	0, 0001	0, 0032
Vapor d' água na Atmosfera	-	-	12,9	0, 0009	0, 0368
Umidade do Solo			16,5	0, 0012	0, 0471
Total	1.350.955,40	97, 4727	35.029,10	2, 5273	100, 0000

O Brasil possui uma posição privilegiada perante a maioria dos países do mundo com relação à disponibilidade de recursos hídricos. Os reservatórios superficiais de água doce disponíveis no país correspondem a aproximadamente 18% de toda água doce superficial do planeta. Apesar desta grande disponibilidade este recurso, o Brasil também apresenta dificuldades com relação à sua distribuição interna, onde 73% deste recurso encontram-se na bacia Amazônica, que possui menos de 5% da população da brasileira. Os 27% restante deste precioso recurso estão distribuídos pelo país para utilização do restante dos 95% da população brasileira (ANEEL, 2001).

3.2. Barragens e Reservatórios.

Righetto (1998) define barragens e reservatórios como estruturas construídas em seções transversais aos cursos d'água de uma bacia hidrográfica, com objetivo principal de regularização de vazões naturais e conseqüentemente, melhorar a utilização de recursos hídricos superficiais. Similarmente, o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB-NRSP, 1999) define Barragens como: “Estrutura construída transversalmente a um rio com a finalidade de obter a elevação do seu nível d'água e/ou de criar um reservatório de acumulação de água ou de regulação das vazões do rio ou de outro fluido”.

O desenvolvimento das grandes civilizações exigiu a manutenção de suprimentos constantes de água. A necessidade de suprimentos regularizados de vazões para o abastecimento humano e irrigação contribuíram para o desenvolvimento de grandes barragens e reservatórios.

Os registros históricos dos primeiros reservatórios construídos pela ação do homem, ao norte do rio Jordão, datam de 3000 AC (SCHNITTER, 1994).

A barragem de SAAD el KAFARA, localizada a 30 km ao sul do Cairo no Egito, figura-se como uma das mais antigas barragens do mundo. Os seus resquícios arqueológicos sobreviveram até os dias atuais. Construída em enrocamento e alvenaria de pedras, a sua origem data de aproximadamente 2600 AC. Sua principal finalidade seria o abastecimento humano. Acredita-se que sua ruptura ocorreu por galgamento ainda no período construtivo. A tabela 3.2. lista algumas das principais barragens e reservatórios da antiguidade.

TABELA 3.2 - Principais Barragens da Antiguidade (LCEC-197? e SCHNITTER-1994).

Barragem	Período	Característica	Local	Finalidade	Obs
SADD el-KAFARA	2600 AC	Barragem de enrocamento e alvenaria de pedra calcária. Possuía 100 m de comprimento e 12 m de altura	30 km ao Sul do Cairo, Egito.	Abastecimento	Provável Ruptura por Galgamento
LAKE MOERIS	2300 AC	Barragem de Terra	80 km SW do Cairo, Egito.	Controle de Cheias	
NAHRWAN	2100 AC	Barragem de Terra, 12 m de altura no Rio Tigre, canal com 120 m de largura, 5 m de profundidade e 400 km de comprimento.	NINEVE, na Babilônia, hoje Iraque.	Irrigação	
MARIB, ou SADD el ARIM	750 AC	Alvenaria de pedra com mais de 15 m de altura	60 km de Marib no Yemen	Irrigação	Antigo Reino de Sabá
NEGEV	200 AC	Sistema de pequenas barragens de 2 a 3 m de altura, base de 7 a 8 m, em alvenaria de pedra.	Israel, no deserto de NEGEV	Irrigação	

Atualmente os reservatórios e barragens continuam sendo de fundamental importância para o desenvolvimento humano. Atualmente os grandes reservatórios são construídos não apenas para atendimento as demandas de abastecimento e irrigação, mas para finalidades múltiplas, como: abastecimento, irrigação, geração de energia, navegação de interiores, lazer, controle de cheias, aquicultura, utilização industrial, etc.

3.3. Aproveitamento Hidroelétrico

O processo de geração de energia elétrica pode ser simplificado como sendo a transformação da energia potencial/cinética da água armazenada em energia elétrica, através de um conjunto turbina-gerador (Francato, 2008).

Este processo de transformação é chamado de “geração hidrelétrica”. A água originariamente armazenada em reservatórios em forma de energia potencial é convertida em energia de movimento (cinética) durante a passagem do fluxo da água pelo circuito de hidráulico. O fluxo d’ água movimenta o conjunto hidromecânico (turbina/gerador), convertendo a energia de movimento (cinética) em energia elétrica. A energia elétrica gerada em alta tensão é conduzida através de condutores elétricos a uma subestação elevadora. Na subestação a alta tensão é elevada para níveis de extra-alta tensão através de transformadores elevadores. Na seqüência é transmitida e distribuída através de linhas de alta e baixa tensão até os centros consumidores. A figura 3.1 mostra o layout do processo descrito acima, com a identificação dos principais elementos.

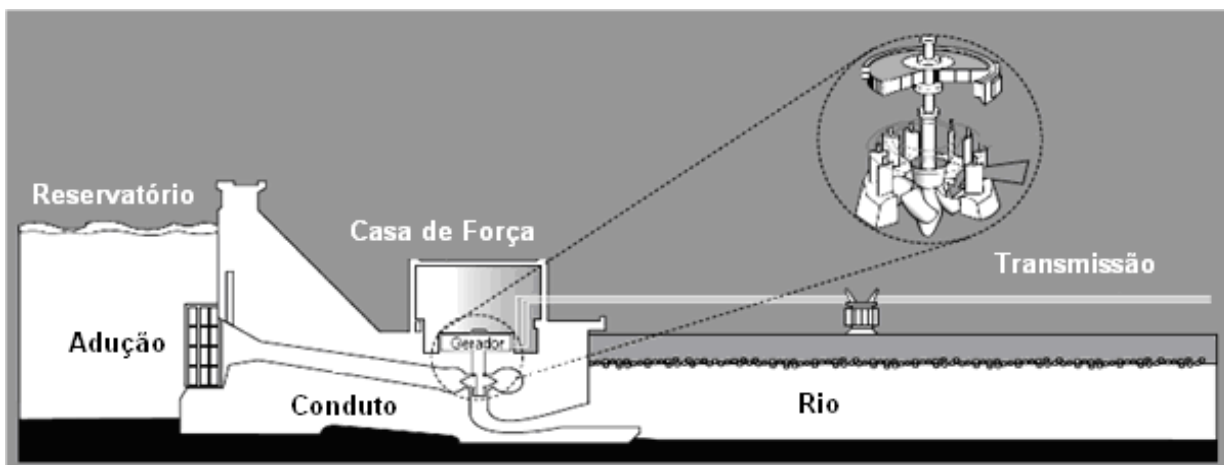


FIGURA 3.1 - Perfil Esquemático de Geração de Energia Hidrelétrica (Aneel, 2008).

A equação (1) representa a transformação da energia potencial da água em energia elétrica pelo sistema hidrogerador.

$$eh_i = ep_i \times rt_i \times rg_i \dots\dots\dots(1)$$

Onde:

eh_i - Energia produzida na usina hidroelétrica i ao longo de um período;

ep_i - Energia potencial da massa de água que é usada para acionar as turbinas na usina hidroelétrica i ao longo de um período de tempo considerado;

rt_i - Rendimento da turbina da usina hidroelétrica i;

rg_i - Rendimento do gerador da usina hidroelétrica i;

3.3.1. Estruturas de uma Usina Hidrelétrica.

As usinas hidrelétricas são formadas por um conjunto de estruturas com finalidades específicas, como: reservatório, barragem, vertedouros, bacia de dissipação, circuito de adução/sucção, casa de força, canal de fuga e subestação.

Reservatório – “Lago ou volume de água acumulada por uma ou mais barragens e/ou diques, limitado por suas margens” (Ministério da Integração Nacional, 2002).

Os reservatórios, em decorrência do período de regularização, podem classificar-se como reservatórios de acumulação (grande capacidade de armazenamento) ou do tipo “fio d’água” (baixa capacidade de acumulação).

Barragem - “Estrutura construída transversalmente a um rio com a finalidade de obter a elevação do seu nível d’água e/ou de criar um reservatório de acumulação de água ou de regulação das vazões do rio ou de outro fluido” (CBDB-NRSP, 1999). As barragens podem ser construídas com diversos tipos materiais, os mais usuais são: concreto, enrocamento, solo e alvenaria. Por questões econômicas as grandes barragens utilizam basicamente dois tipos de material: concreto ou material solto (solo e enrocamento).

As barragens de concreto em decorrência da concepção de projeto podem ser de gravidade, gravidade aliviada, arco, contraforte, compactada com rolo, etc.

As Barragens de material solto podem ser construídas em terra homogênea, terra zoneada, em enrocamento com núcleo de argila, enrocamento com face impermeável, etc.

Vertedouros – Estruturas mais importante do empreendimento. Tem a finalidade de garantir à segurança quando da ocorrência de cheias adversas, permitindo

o extravasamento de vazões superiores à capacidade de geração ou armazenamento da usina. Normalmente dimensionado para vazão máxima de cheia, para um período de recorrência de 10.000 anos, também denominada de vazão decamilenar. Outra metodologia muito utilizada nos países do hemisfério norte para determinação da cheia máxima de projeto é fundamentada na precipitação máxima provável (PMP). Quanto ao controle de vazão, os vertedouros podem ser do tipo escoamento livre (soleira livre) ou controlado através de comportas (Superfície ou Fundo).

Bacia de Dissipação – Responsável pela dissipação da energia proveniente do fluxo de água liberado pelos vertedouros, minimizando a ocorrência de processos erosivos na própria estrutura ou a jusante.

Circuito de Adução/Sucção – Estrutura constituída normalmente por um canal de aproximação, tomada d'água, comportas de segurança e manutenção, conduto forçado, caracol (para turbina do tipo Francis) ou Caixa espiral (para turbina do tipo Kaplan), distribuidor e conduto de sucção e comporta de manutenção.

Casa de Força – Estrutura que abriga os principais equipamentos eletromecânicos do empreendimento, tais como: conjunto turbina-gerador, painéis de proteção, medição, comando e controle.

Canal de Fuga – Estrutura responsável pela restituição das vazões provenientes do processo de geração ao leito original do rio.

Subestação – Instalação que abriga um conjunto de equipamentos elétricos, sendo os principais: transformadores, seccionadoras, disjuntores, etc. As subestações são responsáveis pela conexão entre os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e podem ser do tipo: elevadora, interligadora, radial, distribuição, etc.

3.3.2. Dimensionamento de Reservatórios.

Reservatórios são elementos fundamentais para o processo de produção de energia elétrica. A utilização de reservatórios possibilita a regularização do fluxo de vazões de um rio, permitindo a manutenção contínua do processo de geração independentemente da influência dos regimes de vazões naturais. Segundo Lopes e Santos (2002), os reservatórios também podem ser descritos, do ponto de vista físico, pelos seus níveis e volumes característicos: Nível Mínimo Operacional (Na. Min.), Nível Máximo Operacional (Na. Max), Nível Máximo Maximorum (Na Max. Max.), Volume Útil, Volume Morto e Volume de Espera. A figura 3.2 ilustra a locação e finalidade de cada volume em um reservatório.

Volume Morto – Volume armazenado abaixo do nível mínimo operacional. Este volume não é aproveitado no processo de geração. Porém este volume é importante para determinação da vida útil do aproveitamento. A ocupação desta região pela acumulação de sedimentação indisponibiliza o aproveitamento.

Volume Útil – Volume do reservatório localizado entre o Nível Mínimo de Operação e o Nível Máximo Útil. Este volume é responsável em manter o processo de geração de energia. Este volume está submetido ao processo de regularização periódico.

Volume de Espera – É a parcela alocada no volume útil do reservatório, abaixo do nível máximo operacional. Este volume tem como objetivo amortecer ondas de cheias visando ao atendimento de restrições de jusante.

Volume de Segurança – Volume do reservatório localizado entre o nível máximo normal e o nível máximo maximorum. Este volume é dimensionado exclusivamente para o amortecimento da cheia máxima de projeto.

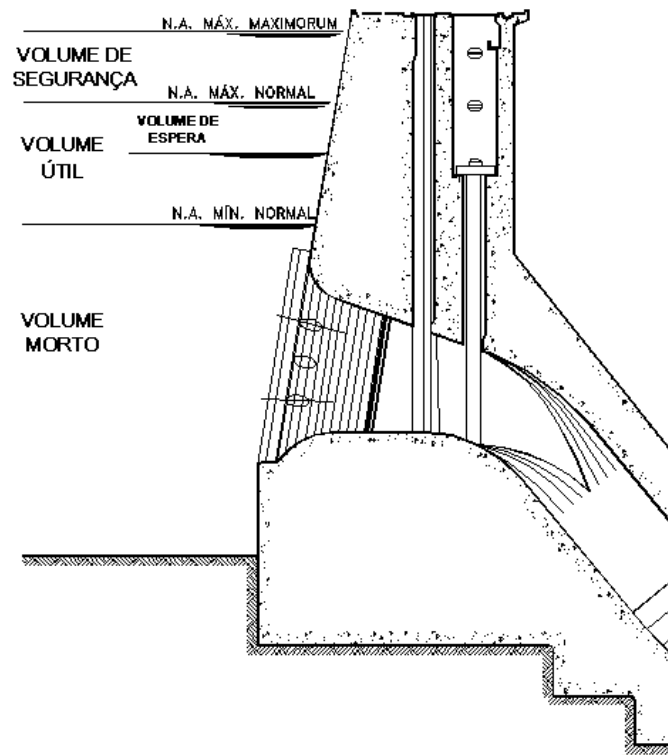


FIGURA 3.2 - Distribuição de Volumes em um Reservatório

Conforme apresentado por Lopes e Santos (2002), os métodos de cálculo para dimensionamento do volume útil de um reservatório podem ser classificados em *métodos simplificados*, *modelos de otimização* e *modelos de simulação*. Os métodos simplificados apresentam vantagens relativas à simplicidade de cálculo e facilidade de interpretação, porém apresentam limitações para dimensionamento de sistemas complexos de utilização. Entre estes modelos podemos citar o método do diagrama de massas.

Os modelos que fundamentados em princípios de otimização e simulação tiveram uma grande expansão após o desenvolvimento dos sistemas computacionais, possibilitando a modelagem de situações mais complexas, simulando-se vários cenários. Situação comum na prática da gestão integrada de recursos hídricos.

3.4.A Energia no Mundo.

O mundo, segundo a BP Global (2008), consumiu o equivalente a 129.061,63 TWh de energia em 2007, como apresentado na Tabela 3.3. A energia é um dos principais insumos para o desenvolvimento econômico. Segundo dados da ANEEL (2008), os Estados Unidos da América, com um consumo de 21,3%, mantém a liderança do consumo global de energia. Somando-se com ao consumo do Canadá e México, a América do Norte consome o equivalente a 25,6% da energia total produzida no mundo. A Europa/Eurásia (30 países) consumiu o equivalente a 26,9%. A Ásia Pacífica, contribui com 34,3% do consumo mundial.

TABELA 3.3 - Consumo de energia no mundo, 2007 (ANEEL, 2008).

Combustível	Mtep	TWh
Petróleo	3.952,80	45.962,79
Carvão	3.177,50	36.947,67
Gás Natural	2.637,70	30.670,93
Hidráulica	709,20	8.246,51
Nuclear	622,00	7.232,56
Total	11.099,30	129.061,63

O Brasil, com a quinta maior população do mundo (191 milhões de habitantes – IBGE 2009), possui mais de 61,5 milhões de unidades consumidoras (ANEEL, 2008). Este universo representa o acesso à rede elétrica de aproximadamente 95% da população brasileira em 99% dos municípios brasileiros.

3.4.1. A Energia no Brasil.

Uma das características da matriz energética brasileira é a diversificação das fontes de energia. A matriz energética brasileira utiliza energias provenientes de fontes renováveis, como hidrelétricas, eólica, PCHs, biomassa, além de fontes não renováveis como (Gás Natural, Derivados do Petróleo, Carvão e Nuclear). Para o seguimento de geração de energia elétrica, existe uma predominância pela geração hidroelétrica. A Tabela 3.4, apresenta o comportamento da oferta e consumo de energia em 2008 e 2009, com o respectivo índice de variação no período. Os dados foram extraídos do BEN 2010 (Balanço Energético Nacional, 2010), desenvolvido pelo Ministério das Minas e Energia em 2010, através da EPE.

TABELA 3.4 - Distribuição do Consumo de Energia no Brasil, 2008 e 2009 (MME, 2010).

Principais Parâmetros	Unidade	2009	2008	Δ%
Produção de Petróleo	10 ³ bbl/dia	2.029,00	1903,8	6,60%
Produção de Gás Natural	10 ³ bbl/dia	57,9	59,2	-2,10%
Geração de Energia Elétrica	TWh	466,2	463,1	0,70%
Consumo de Combustíveis Líquidos	10 ⁶ l/d	298,1	290,3	2,70%
Consumo de Energia Elétrica	TWh	426,0	428,3	-0,50%
Consumo Residencial de Energia Elétrica	TWh	100,6	95,6	5,30%
Consumo Industrial de Energia Elétrica	TWh	186,7	197,2	-5,30%
Oferta Interna de Energia	10 ⁶ tep	243,9	252,6	-3,40%
Oferta Interna de Energia Elétrica	TWh	509,5	506,5	0,60%
População	10 ⁶ hab	191,4	189,6	1,00%
PIB	10 ⁶ US\$	1.573,14	1.576,30	-0,20%

O setor de geração de energia elétrica brasileira caracteriza-se como um sistema hidrotérmico. Segundo o banco de Informações de Geração (BIG), da ANEEL (2010), o Brasil possui um total de 2.323 usinas de geração de energia elétrica em operação. A capacidade total instalada é de 111.522 MW (megawatts) – incluindo os 50% da produção da usina hidroelétrica de Itaipu (Itaipu Brasileira).

As 2.323 unidades de geração de energia elétrica estão distribuídas entre as 174 usinas hidroelétricas, 1.387 usinas térmicas abastecidas por fontes diversas (gás natural, biomassa, óleo diesel e óleo combustível), 382 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), 02 usinas nucleares, 326 são centrais geradoras hidrelétricas (pequenas usinas hidrelétricas) e 04 usinas solares. O segmento possui mais de 1.100 agentes regulados entre concessionários de serviço público de geração, agentes comercializadores, auto-produtores e produtores independentes.

A figura 3.3 ilustra a distribuição do consumo de energia elétrica total e por região brasileira verificada em (ONS, 2010). A Tabela 3.5, apresenta o histórico de crescimento da oferta de energia, PIB e população desde a década de 70 (MME, 2010).

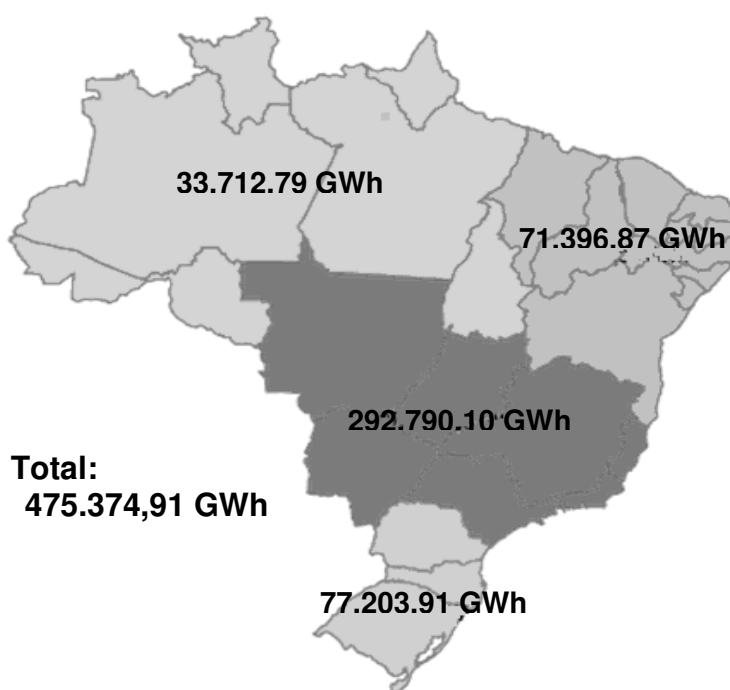


FIGURA 3.3 - Consumo de Energia Elétrica entre as Regiões Brasileiras, 2009 (ONS, 2010).

TABELA 3.5 - Crescimento da Oferta de Energia, População e PIB (MME, 2010).

Principais Parâmetros	Unid.	1970	1980	1990	2000	2008	2009
Oferta Interna de Energia	10 ⁶ tep	66,9	114,8	142	190,6	252,6	243,9
Oferta Interna de Energia Elétrica	TWh	45,7	139,2	249,4	393,2	506,5	509,5
População	10 ⁶ hab	93,1	118,6	146,6	171,3	189,6	191,4
PIB	10 ⁶ US\$	346,5	792,7	926,7	1185	1576,3	1573,4

3.4.2. A Estrutura Institucional do Setor Elétrico Brasileiro.

O modelo institucional atual do setor elétrico teve início a partir da Lei no 9.427, de dezembro de 1996, que instituiu a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A ANEEL foi criada para regular e fiscalizar um novo setor elétrico, formado por empresas prestadoras de serviço público, de controle estatal e privado, nas áreas de geração, transmissão e distribuição.

Em 2004 a substituição do modelo utilizado para concessão de novos empreendimentos de geração, pelo modelo de oferta do menor preço de venda da energia produzida e criação de dois ambientes para celebração de contratos de compra e venda de energia: o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), exclusivo para geradoras e distribuidoras, e o Ambiente de Contratação Livre (ACL), do qual participam geradoras, comercializadoras, importadores, exportadores e consumidores livres.

Para atender as necessidades do novo modelo, outras instituições foram criadas como o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que substituiu o GCOI, na operação do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Para atuação e contabilização do mercado de energia, foi criado o Mercado Atacadista de Energia (MAE), substituído posteriormente pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Em 2004 o Ministério de Minas e Energia

(MME), constituiu a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), com a missão principal de desenvolver os estudos necessários ao planejamento da expansão do sistema elétrico.

A estrutura institucional exigida para regulamentação, fiscalização e operacionalização do novo modelo do setor elétrico e as suas respectivas interações com o mercado, sociedade e instituições governamentais pode ser observada no diagrama da figura 3.4.

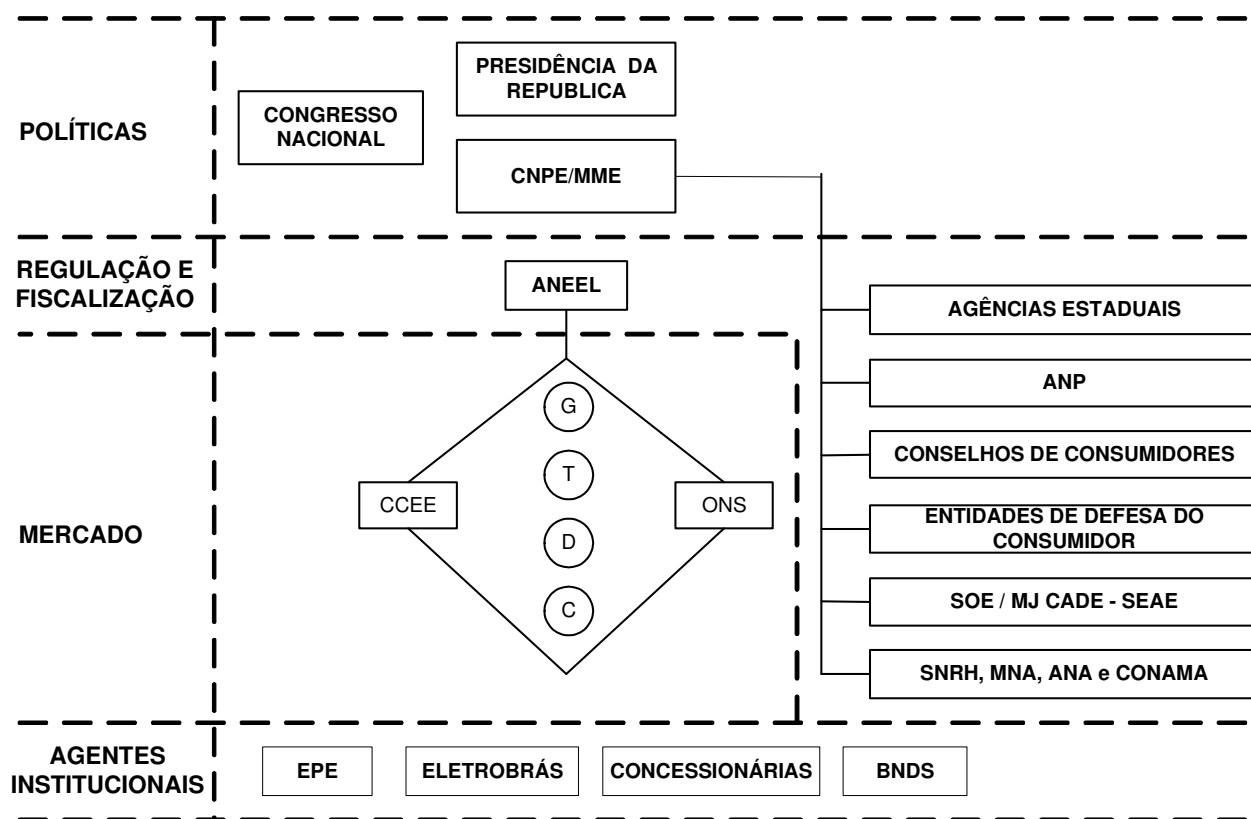


FIGURA 3.4 - Estrutura Institucional do Setor Elétrico Brasileiro, 2008 (ANEEL, 2008).

Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) - Órgão de assessoramento do Presidente da República para formulação de políticas nacionais e diretrizes de energia, visando, dentre outros, o aproveitamento natural dos recursos energéticos do país, rever periodicamente a matriz energética e estabelecer diretrizes

para programas específicos. É órgão multi-ministerial presidido pelo Ministro de Estado de Minas e Energia.

Ministério de Minas e Energia (MME) - Encarregado da formulação, do planejamento e implementação de ações do Governo Federal no âmbito da política energética nacional.

Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) - Pessoa jurídica de direito privado, sem fins lucrativos, sob regulação e fiscalização da ANEEL, com finalidade de viabilizar a comercialização de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional - SIN. Administra os contratos de compra e venda de energia elétrica, sua contabilização e liquidação.

Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) - Pessoa jurídica de direito privado, sem fins lucrativos, sob regulação e fiscalização da ANEEL, tem por objetivo executar as atividades de coordenação e controle da operação de geração e transmissão, no âmbito do SIN.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) - Autarquia sobre regime especial, vinculada ao MME, com finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do Governo Federal.

Agentes Geradores (G) - São autorizados ou concessionários de geração de energia elétrica, que operam plantas de geração e prestam serviços ancilares.

Agentes de Transmissão (T) - Agentes detentores de concessão para transmissão de energia elétrica, com instalações na rede básica.

Agentes de Distribuição (D) - Operam um sistema de distribuição na sua área de concessão, participando do Sistema Interligado e sendo usuários da Rede Básica.

Contratam serviços de transmissão de energia e serviços ancilares do Operador Nacional do Sistema Elétrico.

Consumidores Livres (C) - Consumidores que têm a opção de escolher seu fornecedor de energia elétrica, conforme definido pela resolução da ANEEL.

Agentes Importadores - São agentes titulares de autorização para implantação de sistemas de transmissão associados à importação de energia elétrica.

Agentes Exportadores- São agentes titulares de autorização para implantação de sistemas de transmissão associados à exportação de energia elétrica.

Agente Comercializador da Energia de Itaipu- Itaipu é uma entidade binacional, pertencente ao Brasil e ao Paraguai. O relacionamento entre os dois países segue tratados internacionais específico. A energia de Itaipu recebida pelo Brasil representa cerca de 30% do mercado de energia da região sul/sudeste/centro-oeste. A comercialização dessa energia no Brasil é coordenada pela Eletrobrás.

3.4.3. Sistema Interligado Nacional.

O Sistema Interligado Nacional (SIN) abrange as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte do Norte. O SIN concentra aproximadamente 900 linhas de transmissão que totalizam 89,2 mil quilômetros, fonte (ANEEL, 2008). Integram a rede do Sistema Interligado Nacional, as linhas de transmissão com classe de tensão de 230, 345, 440, 500 e 750 kV. Este sistema conecta 96,6% de toda a capacidade de produção de energia elétrica do país (Incluindo a produção de Itaipu). A figura 3.5 apresenta o mapa do SIN e respectiva malha de transmissão/interligação.

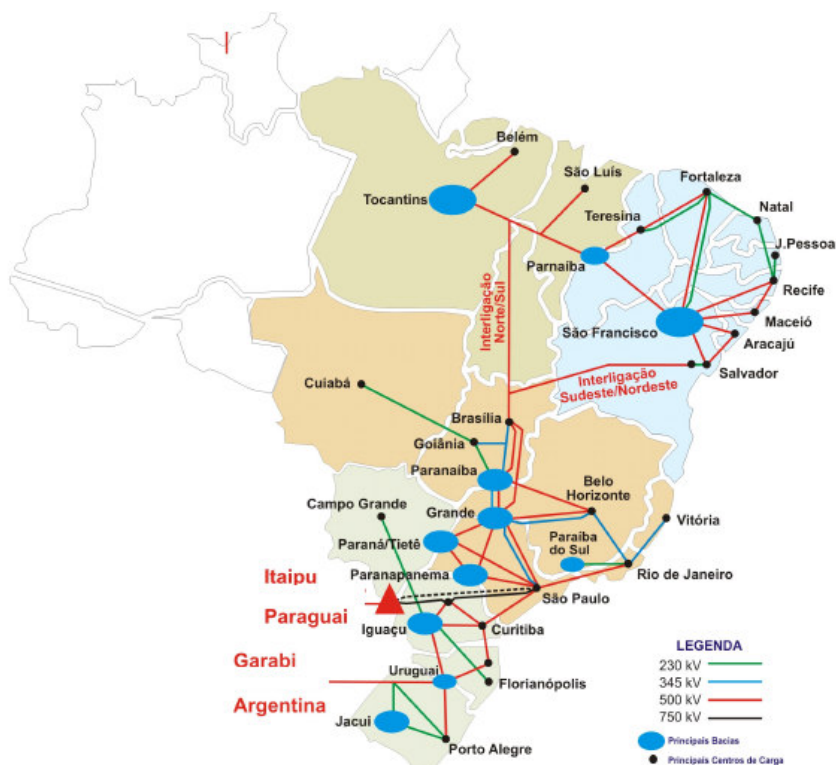


FIGURA 3.5 - Integração Eletroenergética no Brasil, 2008 (ONS, 2009).

3.4.4. Operação Hidroenergética do SIN.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é responsável pela coordenação e controle da operação realizada pelas companhias geradoras e transmissoras em suas respectivas áreas de concessão, sob a fiscalização e regulação da ANEEL.

O ONS, no exercício de suas atribuições legais, executa atividades com objetivo de promover a otimização da operação do sistema eletroenergético, observando os padrões técnicos, critérios de confiabilidade e regras de mercado.

A independência do ONS na gestão da operação do sistema interligado nacional é de fundamental importância para a otimização máxima dos recursos

hidrológicos e energéticos disponíveis em cada bacia, aproveitando ao máximo os regimes hidrológicos diferenciados.

O ONS para elaboração do planejamento hidroenergético e conseqüente tomada de decisão de despacho entre as bacias utiliza programas computacionais fundamentados em projeções e elaboração de cenários para a oferta de energia elétrica. O mesmo programa computacional é utilizado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) para definição dos preços da energia a serem praticados nas operações de curto prazo, no mercado livre. Os principais programas utilizados pelo ONS para o planejamento são:

a) NEWAVE (Modelo para otimização hidrotérmica para subsistemas equivalentes interligados);

b) DECOMP (Modelo para otimização da operação de curto prazo com base em usinas individualizadas).

O sub-módulo 18.20 do Procedimento de Rede do ONS define programa NEWAVE como sendo “uma ferramenta de planejamento energético da operação com representação agregada do parque hidroelétrico e cálculo da política de operação, baseado na técnica de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE). Esse modelo tem como objetivo determinar a estratégia de operação de médio prazo, de forma a minimizar o valor esperado do custo total de operação ao longo do período de planejamento da operação; analisar as condições de atendimento energético no horizonte de médio prazo; informar as condições de fronteira por meio da função de custo futuro para o modelo de programação de curto prazo; e calcular os custos marginais de operação mensais para cada patamar de carga”.

O modelo DECOMP tem como objetivo determinar a estratégia de operação de curto prazo que minimize o valor esperado do custo total de operação para o horizonte do planejamento anual da operação, considerando as usinas individualizadas que compõe o sistema hidrotérmico interligado. A obtenção dessa estratégia ótima de

operação define, para cada patamar de carga, a geração de cada usina hidráulica e térmica, os intercâmbios entre os subsistemas e os contratos de importação e exportação de energia. O DECOMP representa as restrições físicas e operativas relativas a limites de turbinamento, conservação da água, defluência mínima, armazenamento, atendimento à demanda etc. A incerteza acerca das vazões afluentes aos diversos aproveitamentos do sistema é representada por meio de cenários hidrológicos. A metodologia empregada para a solução do problema é a PDDE. Os principais resultados do modelo são o balanço hidráulico, o balanço de geração, consumo das unidades elevatórias e os custos marginais de operação semanais e mensais, calculados por patamar de carga (ONS, 2010).

3.4.5. Hidrologia.

O Brasil, como país de dimensão continental, possui regimes hidrológicos diferenciados entre as suas bacias hidrográficas. Esta situação tem sido utilizada estrategicamente pelo ONS como ferramenta para flexibilização da operação do SIN , buscando o máximo de aproveitamento hídrico na operação do sistema elétrico. O reforço do sistema de Transmissão possibilitou a ampliação de intercâmbio entre os blocos de geração das bacias, auxiliando na redução dos riscos associados às incertezas hidrológicas.

Na seqüência serão apresentadas as principais terminologias utilizadas pelo setor elétrico nacional para representação e quantificação da energia potencial armazenada nas bacias e reservatórios das usinas hidroelétricas. A terminologia e metodologia utilizada para classificação e determinação das energias afluentes e armazenadas nos reservatórios do sistema estão definidas pelos módulos de procedimento da rede do ONS. As figuras 3.6 e 3.7 apresentam de forma gráfica o comportamento histórico da energia natural afluente (ENA) para os sub-sistemas

brasileiros e para a bacia do rio Tietê. A energia está representada em Megawatt/médios, com referência a MLT (Média de Longo Termo) do período de 1931 a 2007 (ONS, 2010).

ENA é definida como sendo a energia elétrica que pode ser gerada a partir da vazão natural em um aproveitamento hidroelétrico (Módulo 20 – Procedimento de Rede – NOS, 2010)

EAR é definida como a energia elétrica associada ao volume armazenado em um reservatório, cujo cálculo, considera-se a produtividade do reservatório das demais usinas hidroelétricas a jusante, descontando-se o volume morto (Módulo 20 – Procedimento de Rede – ONS, 2010)

Energia Assegurada de Usina é a fração de energia assegurada do sistema alocada para uma usina (Módulo 20 – Procedimento de Rede – ONS, 2010).

Energia Assegurada do Sistema é o montante hipotético de energia que pode ser produzida pelo sistema com um nível de garantia prefixado, calculado conforme critérios aprovados pela ANEEL (Módulo 20 – Procedimento de Rede – ONS, 2010).

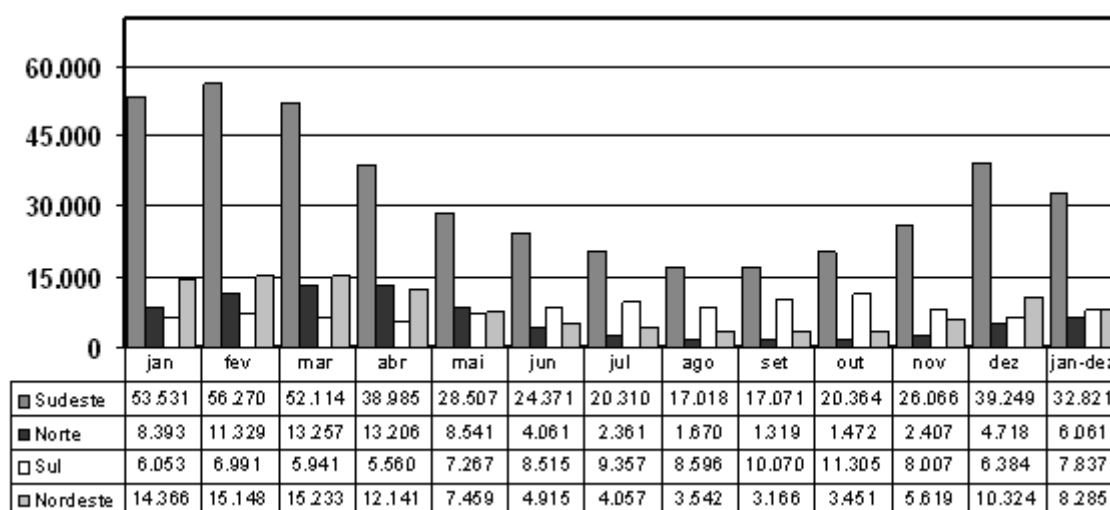


FIGURA 3.6 - ENA-MLT (MW med) para os Sub-Sistemas brasileiros, 1931-2007 (ONS, 2010)

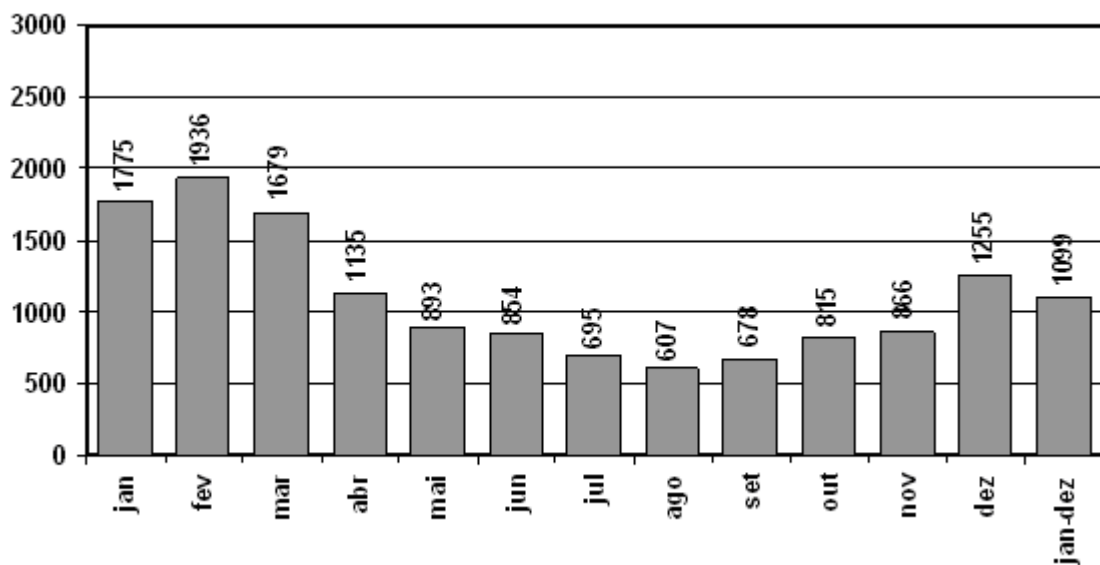


FIGURA 3.7 - ENA-MLT (MW med) para Bacia do Rio Tietê, 1931-2007 (ONS, 2010).

3.5.A Navegação de Interiores.

Navegação de interior é aquela realizada através de rios, canais (naturais ou artificiais), lagos, lagoas, baías e estuários localizados no interior do Continente (Fernandes, 2001). Conceitualmente o termo navegação de interior abrange qualquer modalidade e tipo de embarcação utilizada para navegação no interior de continentes.

Quanto à sua natureza e formação, Novak. et al.(1996), classifica as vias de navegação de interiores em três classes distintas:

- Canais Naturais, formados por rios, afluentes ou canais naturais não modificados através de obras de engenharia;
- Rios Canalizados, canais ou rios que possuem vazões regularizadas através de obras de engenharia;

- Canais Artificiais, canais de navegação construídos através de desvios de rios, bombeamentos ou barragem;

A utilização de uma via fluvial como “Hidrovia”, para tráfego de embarcações de grande porte, esta associado ao atendimento de requisitos técnicos como profundidade, velocidade da correnteza, largura mínima e traçado favorável, necessários para a manutenção da segurança e confiabilidade operacional.

Uma via navegável torna-se formalmente uma hidrovia após ato declaratório do poder público. Desta forma a via navegável integra-se na rede de infra-estrutura planejada de transporte de um país (Fernandes, 2001).

3.5.1. A História da Navegação de Interior.

Os registros históricos sobre a navegação de interior revelam o seu início na antiguidade, com a utilização de embarcações rudimentares construídas a partir de troncos irregulares amarrados entre si para transporte de pessoas e produtos. O deslocamento fluvial passou a configurarem-se como verdadeiras estradas para deslocamento de pessoas, desbravamento de novas áreas e principalmente para o transporte de produtos e materiais pelo interior dos continentes. Um exemplo conhecido sobre a importância da navegação de interior para o desenvolvimento civilizatório é o exemplo registrado no Egito antigo, com a utilização intensa da navegação pelo Rio Nilo.

O oriente também foi o grande utilizador da navegação de interiores para transporte de produtos, assim como o Egito, a China desenvolveu a prática da navegação de interiores, inclusive com a construção de grandes obras de canais e melhoria da infra-estrutura hidroviária (Fernandes, 2001).

O desenvolvimento e utilização mais intensa do sistema hidroviário no ocidente ocorreram no século XX, com a necessidade de transporte de excedentes de produção aos centros de consumo.

As barreiras naturais de nível (cachoeiras, corredeiras, etc), sempre foram os maiores obstáculos para o desenvolvimento e progresso da navegação no interior dos continentes, Estas dificuldades foram superadas por volta do século XIV, com o desenvolvimento das primeiras eclusas, mesmo que em caráter rudimentar.

Durante a revolução industrial no século XIX, o surgimento da ferrovia, com a possibilidade de transporte de grandes volumes a longas distâncias diretamente até os grandes centros de consumo resultou em uma nova paralisação do sistema de navegação de interiores.

Posteriormente, o surgimento do modal de transporte rodoviário que possibilitou maior mobilidade e rapidez no transporte, também veio a contribuir para um retardo no desenvolvimento e avanço do transporte hidroviário.

O aumento da população e do consumo ocorrido no século XX e a conseqüentemente necessidade de transporte de grandes volumes de materiais das regiões de produção/extração até os grandes centros de consumo e transformação, resultou em uma nova revolução nos sistemas de transporte e da navegação de interiores.

A necessidade de transporte de grandes volumes e o desenvolvimento tecnológico ocorrido no último século resultou em um modelo integrado de logística e transporte, com foco na operação integrada, buscando a eficiência máxima de cada modal de transporte. Esta nova “visão” resultou em uma nova expansão dos sistemas hidroviários a nível mundial.

3.5.2. Análise comparativa entre os modais de transporte.

A utilização de cada modalidade de transporte de forma racional, otimizada e integrada é fundamental para melhoria da eficiência e competitividade da economia de um país, tanto para o mercado regional, quanto para o internacional em que se processam as relações comerciais no mundo globalizado (PNLT, 2007).

A tabela 3.6 apresenta a distribuição em percentual de cargas para os principais modais de transporte (rodoviário, ferroviário e hidroviário), para diversos países (PNLT, 2007).

TABELA 3.6 - Participação de cada modal no transporte de vários países (PNLT, 2007).

Países	Rodovia	Ferrovias	Hidrovia
Rússia	8	81	11
Estados Unidos	32	43	25
Canadá	43	46	11
Austrália	53	43	4
Brasil	58	25	17(*)
Áustria	49	45	6
México	55	11	34
Alemanha	72	15	14
França	81	17	2

(*) Este valor inclui 3,6% de dutos e 0,4% de aéreo (Fonte: ANTT - 2005)

Quando comparamos as principais características técnicas entre os modais de transporte, o transporte hidroviário se destaca por apresentar vários benefícios associados. Os benefícios não estão associados apenas aos custos operacionais diretos, mas também nos custos indiretos (externalidades) citados a seguir, que tanto preocupam o mundo moderno, suscitando verdadeira preferência por esse modal de transporte em toda Europa. Os planos alemães, por exemplo, preconizam alcançar uma

distribuição modal de cargas equivalente a 30% para cada um dos modos (rodoviário, ferroviário e hidroviário) dentro de alguns anos.

Outro aspecto importante do transporte hidroviário é com relação à eficiência energética, maiores capacidades de concentração de cargas, menor consumo de combustível, menores custos de implantação, menores custos operacionais, menores índices de acidentes por TkU, níveis baixos de emissão de ruídos, redução de congestionamentos rodoviários e menor espaço físico (STSP, 2008). A Tabela 3.7 – mostra o custo comparativo referente à implantação/manutenção de uma via de transporte entre modais (STSP, 2008). As Figuras 2.8 e 2.9 ilustram a comparação entre a capacidade entre os modais (STSP, 2008).

TABELA 3.7 - Custo referencial de implantação de vias de transporte (ST-SP, 2008).

Modais	Custo Médio de Construção da Via (US\$/km)	Custo de Manutenção da Via	Vida Útil da Via
Hidroviário	34.000	Baixo	Alta
Ferrovário	1.400.000	Alto	Alta
Rodoviário	440.000	Alto	Baixa

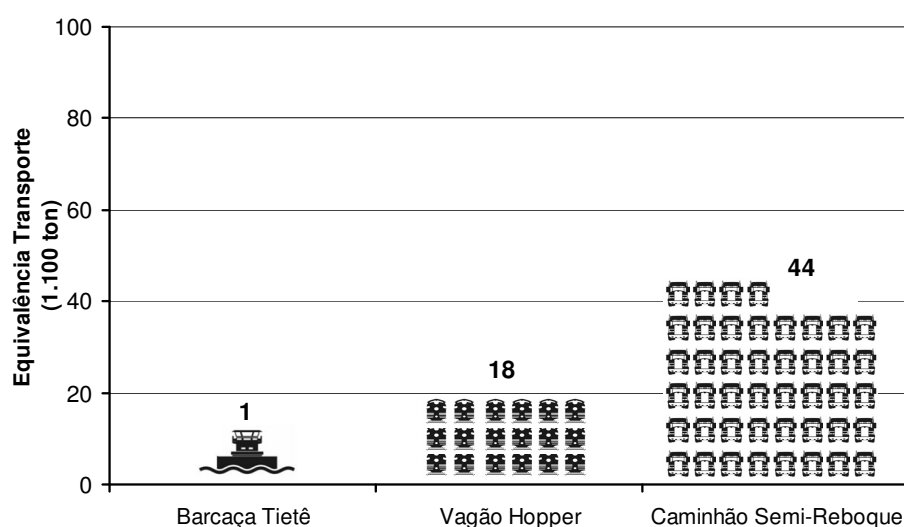


FIGURA 3.8 - Comparação - capacidade e carga (Adaptado de STSP, 2003., NWF, 2008).

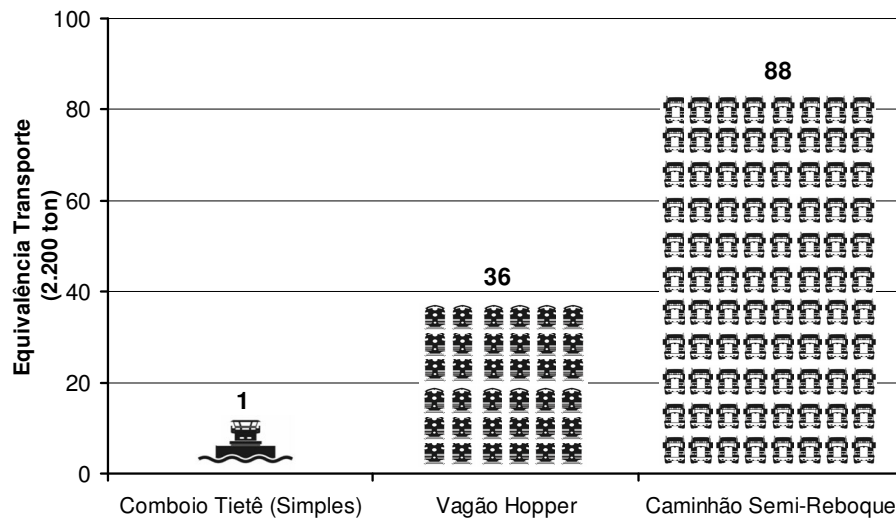


FIGURA 3.9 - Comparação - capacidade e carga (Adaptado de STSP, 2003., NWF, 2008).

Segundo a Agência Nacional de Transportes Aquaviários – (ANTAQ, 2009), no que tange à economia de combustível, o transporte hidroviário se caracteriza como a melhor maneira para transporte cargas. A organização norte-americana National Waterways Foundation – NWF, em conjunto com o U.S. Department of Transportation, no estudo “A Modal Comparison of Domestic Freight Transportation Effects on the General Public”, desenvolveu estudos sobre o consumo de combustível entre modais de transportes. Para o modal rodoviário são necessários 15 (quinze) litros de combustível para transportar mil toneladas por quilômetro útil (TkU). Para o modal ferroviário são necessários 6 (seis) litros de combustível para transportar as mesmas 1000 toneladas, enquanto para o transporte hidroviário são necessários apenas 4 (quatro) litros de combustível. A figura 3.10 ilustra graficamente os resultados obtidos neste estudo, comparativamente para cada modal: rodoviário, ferroviário e hidroviário.

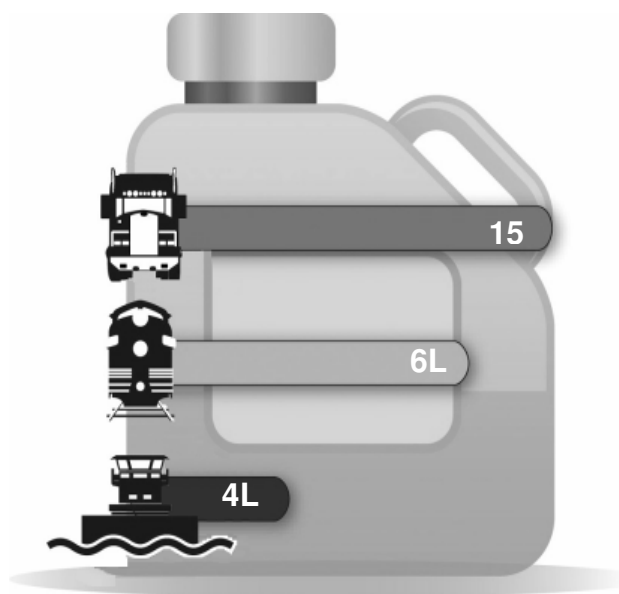


FIGURA 3.10 - Consumo comparativo de combustível (Adaptado da STSP, 2003., NWF, 2008).

O transporte hidroviário é responsável pela menor emissão de monóxido de carbono e óxidos nítricos. Ainda segundo dados do estudo americano, o sistema rodoviário emite 219 g de monóxido de carbono (CO) a cada mil toneladas por quilômetro útil (TKU), o ferroviário, 104 g e o sistema hidroviário, 74 g. Em relação à emissão de óxidos nítricos, o sistema hidroviário também apresenta vantagens sobre os modais ferroviários e rodoviários. Na hidrovia, são emitidos 755 g de óxidos nítricos a cada mil TKU. No ferroviário e rodoviário esse número chega a 1.053 g e 1.178 g, respectivamente. Da mesma forma a figura 3.11 ilustra graficamente as emissões de (CO) para os modais rodoviário, ferroviário e hidroviário.

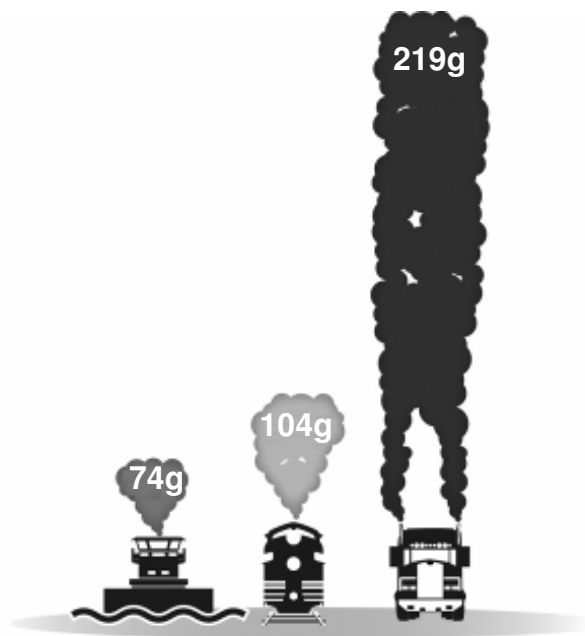


FIGURA 3.11 - Comparação entre modais quanto à emissão CO
(Adaptado de STSP, 2003., NWF, 2008).

3.5.3. A Navegação de Interior no Mundo.

Segundo Fernandes (2001), o potencial de vias navegáveis disponível no mundo é da ordem de 450 mil km. A República Popular da China sozinha possui 123,50 mil km de hidrovias o que representa 27,6% deste potencial. A Federação Russa contribui com mais 102,00 mil km (22,66%). Agregando-se nesta soma outras hidrovias importantes do mundo, como a americana com seus 40,7 mil km, as hidrovias européias com 42,7 mil km, a brasileira com 13,8 mil km e a indiana com seus 5,7 mil km, chegamos a um somatório de 327,14 mil km de hidrovias em operação.

Naturalmente, os países que possuem as maiores extensões territoriais, se beneficiam com os maiores potenciais hidroviários.

A figura 3.12, apresenta em forma gráfica a participação dos principais sistemas hidroviários em operação no mundo.

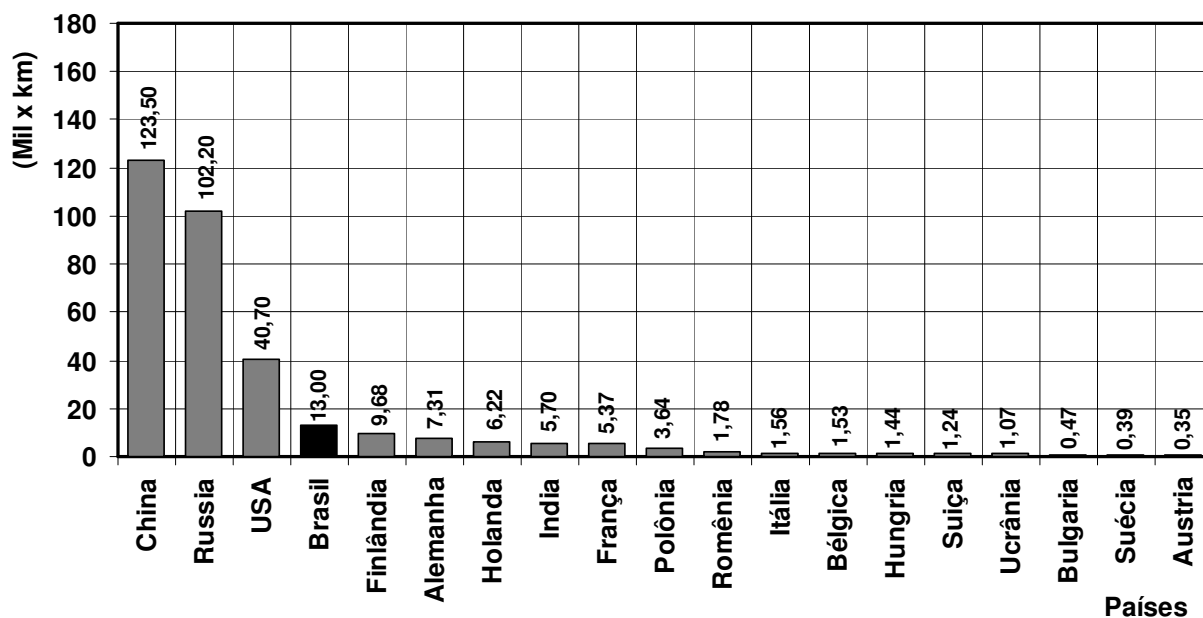


FIGURA 3.12 - Extensão de vias navegáveis no mundo (EUROSTAT, USCAE, IWAI, ANA, UNECE).

3.5.4. A Navegação de Interior nos Estados Unidos.

O sistema de hidroviário norte-americano é o melhor exemplo de desempenho e eficiência no transporte de cargas. A malha hidroviária norte americana atende a 38 estados, com uma cobertura de suas vias de aproximadamente 40,7 mil km de extensão. Movimenta aproximadamente 630 milhões de toneladas anualmente, com valores estimados da ordem de 73 bilhões de dólares (figura 3.13 – USCAE, 2000).

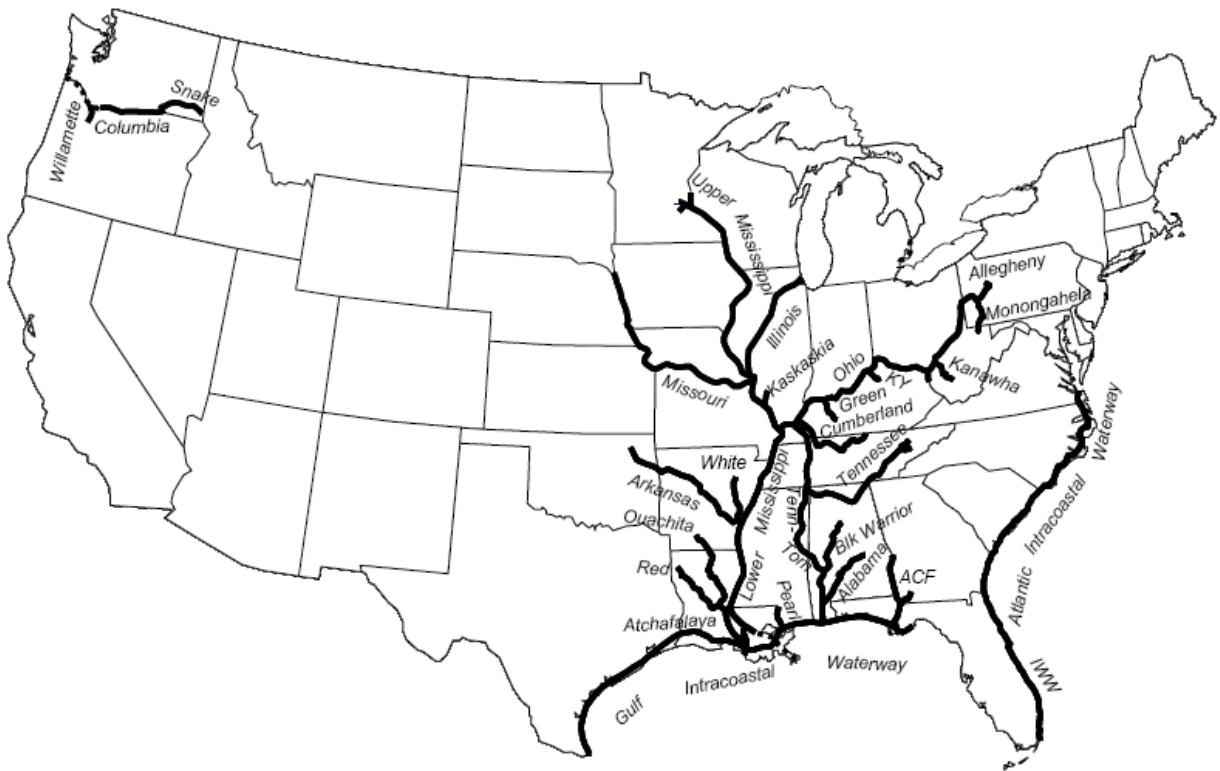


FIGURA 3.13 - Localização das Hidrovias Norte-Americanas (U.S. Army, 2000).

Alguns números demonstram a importância do sistema hidroviário norte-americano para a economia e setores estratégicos da sociedade. Como exemplo, podemos citar o setor energético, onde 20% de toda energia consumida nos EUA, são produzidas por carvão, transportadas pelo sistema hidroviário.

Além do setor de energia, outros setores se beneficiam com a utilização do sistema hidroviário. A produção agrícola utiliza o sistema hidroviário para escoar aproximadamente 60% de toda produção para exportação. Podemos citar outras utilizações importantes, como o transporte de petróleo e combustíveis, agregados para a indústria da construção civil, minerais e químicos estão entre as commodities mais transportadas (figura 3.14 – USCAE, 2000).

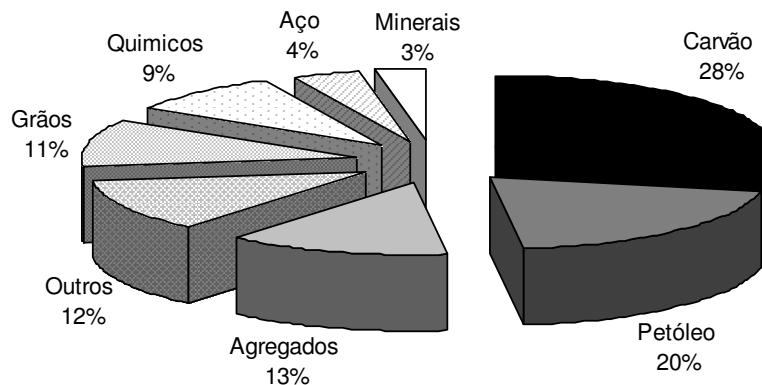


FIGURA 3.14 - Commodity transportada pelas Hidrovias Norte-Americanas (U.S. Army, 2000).

O bom desempenho norte-americano na utilização do transporte hidroviário deve-se a um conjunto de fatores associados, destacando-se principalmente o investimento no setor, a regulação e desenvolvimento integrado entre diversos modais de transporte, objetivando a máxima otimização entre os sistemas de transporte. A figura 3.15 mostra o histograma representativo de movimentação de carga nas últimas duas décadas (em TkU).

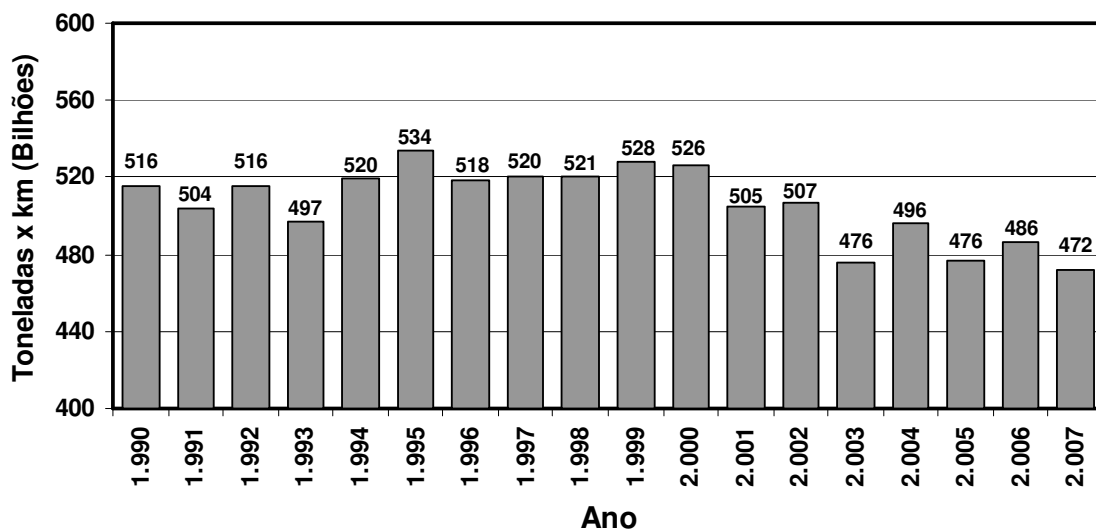


FIGURA 3.15 - Transporte anual de cargas pelas hidrovias Norte-Americanas, em TkU (Departamento do Transporte do USA).

3.5.5. A Navegação de Interior na União Européia.

A União Européia (EU) é uma união supranacional econômica e política formada por 27 estados-membros. A área territorial total da EU é de 4.339.245 km², sendo 3% da superfície em espelho d'água. A população total é de 496.2 milhões de habitantes. O PIB anual é de U\$ 16,77 Trilhões de Dólares.

Os Estados membros que compõem a União Européia (U27) são: Áustria (AT), Bélgica (BE), Bulgária (BG), Chipre (CY), República Tcheca (CZ), Alemanha (DE), Dinamarca (DK), Estônia (EE), Grécia (EL), Espanha (ES), Finlândia (FI), França (FR), Hungria (HU), Irlanda (IE), Itália (IT), Lituânia (LT), Luxemburgo (LU), Latvia (LV), Malta (MT), Holanda (NL), Polônia (PL), Portugal (PT), Romênia (RO), Suécia (SE), Eslovênia (SI) e Republica da Eslováquia (SK).

A União Européia dispõe de um sistema hidroviário com extensão total de 42.700 km. A figura 3.16 mostra o crescimento da milha hidroviária européia nas últimas décadas. O volume de carga atualmente transportada pelas hidrovias européias é da ordem de 145 milhões de TkU (2008). A figura 3.17 apresenta o desempenho do transporte de carga pelas hidrovias européias nas últimas décadas. O transporte hidroviário contribui com 3,6% do volume total da carga transportada. Esta distribuição se altera sensivelmente quando se analisa separadamente os países membros. Na Holanda o transporte hidroviário de cargas representa 41% de transporte, na Bélgica 12%, na França 15%, na Alemanha 14% e na Bélgica 12% (fonte INE). A figura 3.18 apresenta a malha hidroviária européia.

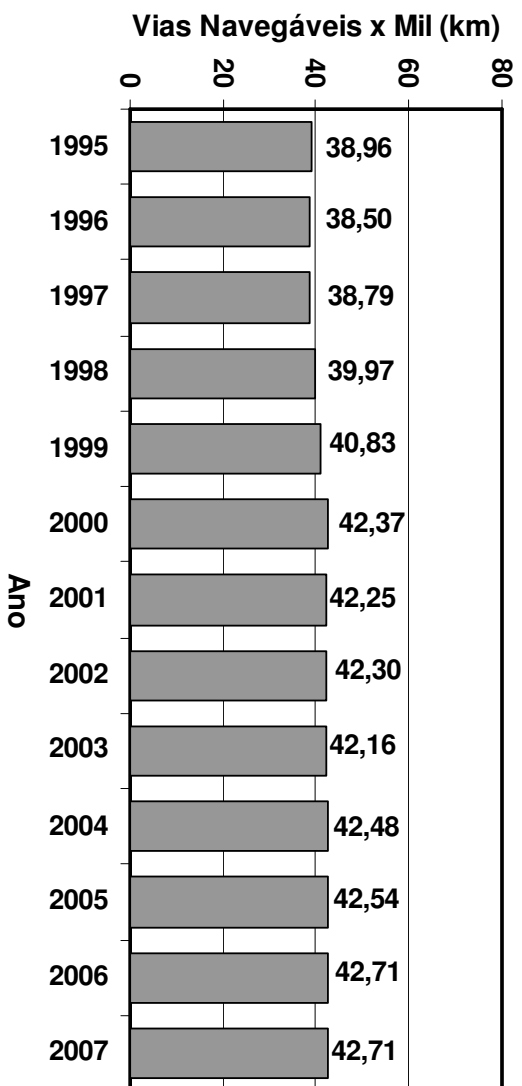


FIGURA 3.16 - Crescimento da malha hidroviária europeia (EUROSTAT, 2009).

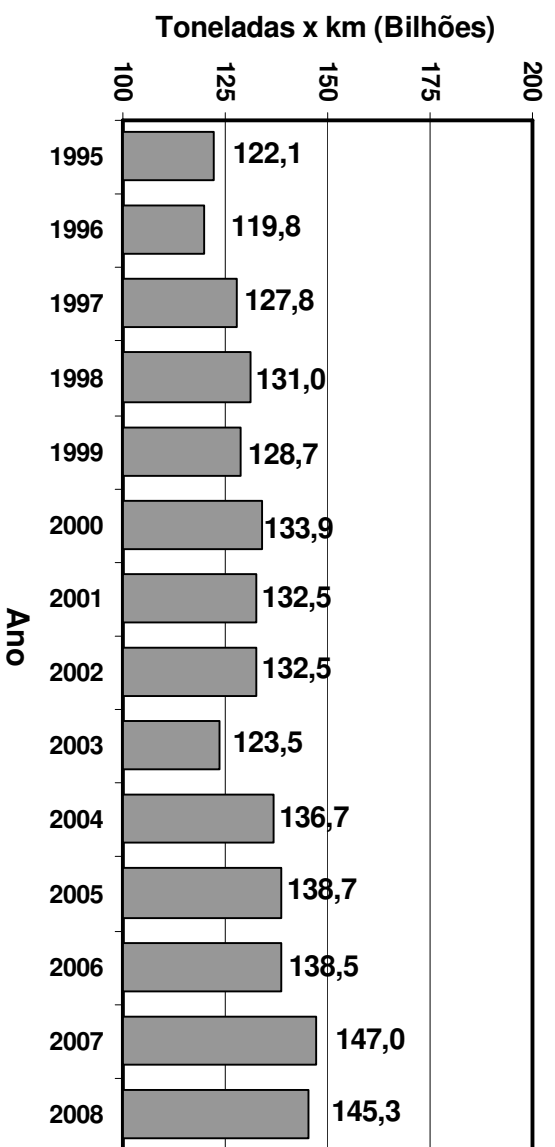


FIGURA 3.17 - Transporte anual de cargas pelas hidroviás Europeias, em Tku (EUROSTAT, 2009).

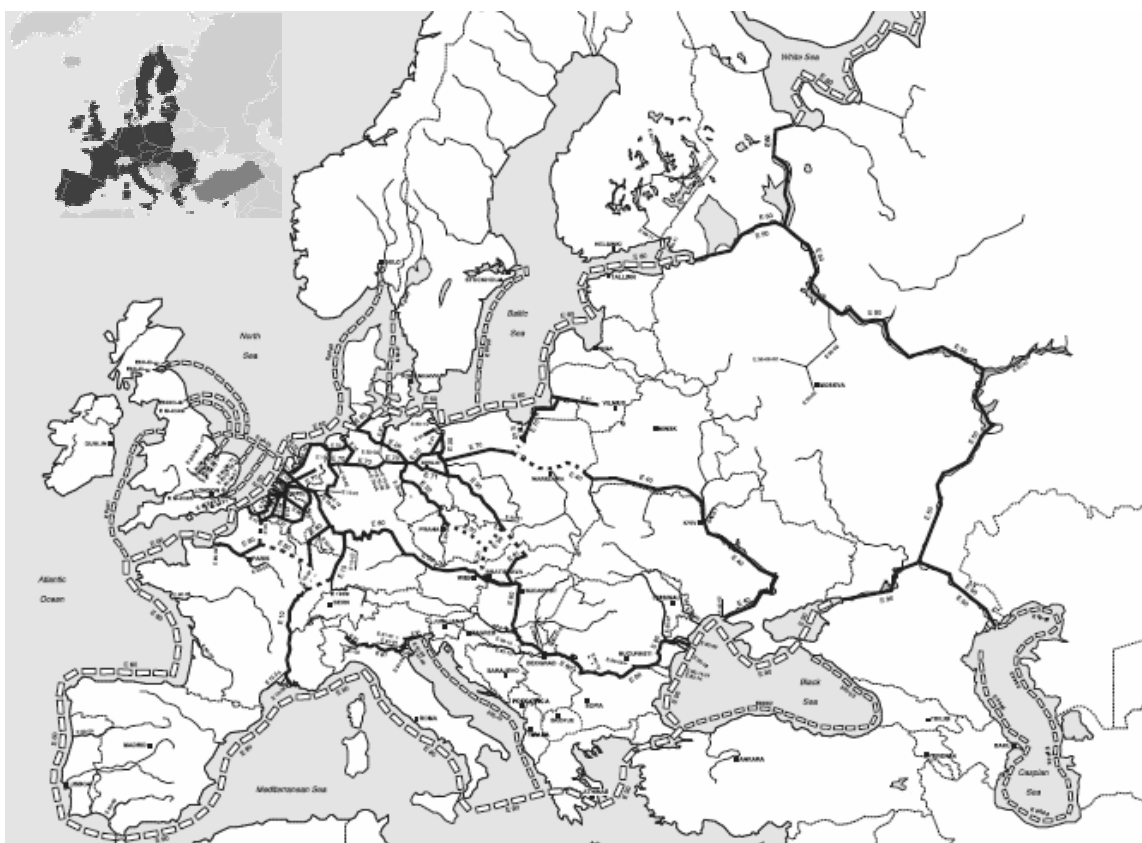


FIGURA 3.18 - Mapa Hidroviário União Européia (INE, 2010).

Aproximadamente metade da malha hidroviária Européia tem condições de receber embarcações com mais de 1.000 toneladas. A integração com os demais modais de transporte possibilitam uma boa logística de transporte. A rede ferroviária da EU, possui mais de 210.000 km de extensão. A malha rodoviária abrange cerca de 4.800 km. Outra importante característica do sistema viário europeu apontado pelo INE é a sua abrangência. Ligando as principais cidades, centros de comércio, indústria, navegação e portos marítimos. A rede hidroviária européia é formada por quatro corredores principais: Corredor Norte-Sul, Reno, Leste-Oeste e Sudoeste.

Um acordo europeu criou a AGN (Rede de Vias Navegáveis Interiores de Importância Internacional). A AGN tem o objetivo de tornar o transporte hidroviário em águas internacional mais eficiente e atraente para os investidores. No total 27.711 km de vias navegáveis europeias se enquadram nos requisitos técnicos exigidos pela AGN.

Em conformidade com o acordo AGN apenas as vias navegáveis que reúnam requisitos mínimos de classe IV (dimensões mínimas dos navios de 85,0 m x 9,50 m) podem ser consideradas como vias de navegação de interiores de interesse internacional. A figura 3.19, trás o diagrama da rede hidroviária europeia e a respectiva classificação de suas vias, conforme a AGN.

Em janeiro de 2006, a Comissão Europeia publicou o plano de ações estratégicas para as vias navegáveis chamado: "NAIADES" (Programa Europeu de Ação Integrada para o Transporte), este programa, durante o período de 2006 a 2013, tem como objetivo atuar em cinco áreas estratégicas: condições de mercado, modernização da frota, o desenvolvimento do capital humano, imagem e infra-estrutura. O programa é dirigido a todos os interessados no transporte fluvial, a EU-27 e instituições membros.

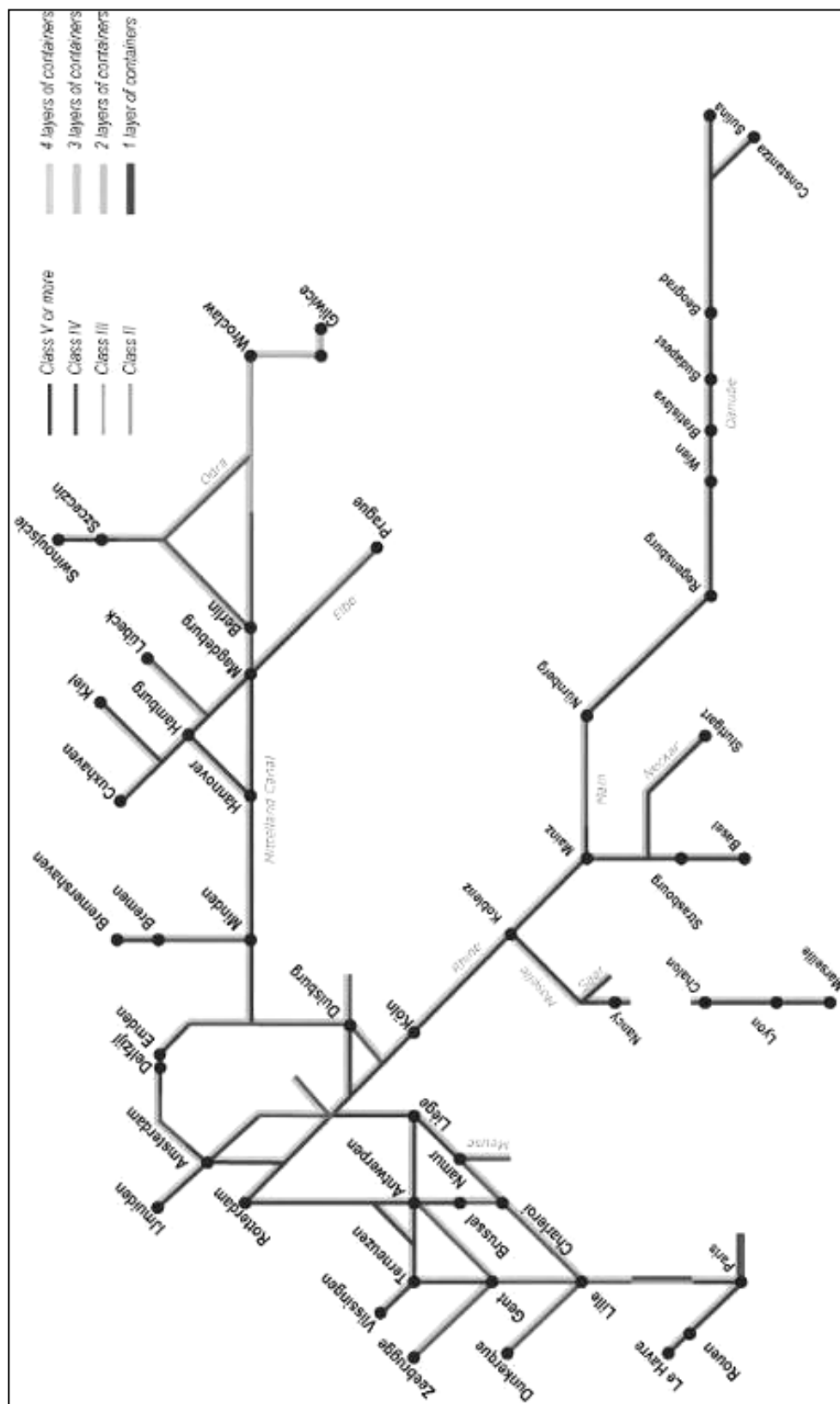


FIGURA 3.19 - Diagrama da Malha Hidroviária Europeia (INE, 2010).

3.5.6. A Navegação de Interior na Federação Russa.

A Federação Russa foi criada após a dissolução da URSS (União das Repúblicas Socialistas Soviéticas) em 1991. A distribuição político-administrativa da Federação Russa é composta por 50 regiões, sendo: 04 autônomas, 21 Repúblicas independentes, 09 territórios, 02 cidades federais e 01 província autônoma. Com área territorial total de 17.075.400 de km² (9% do total da área terrestre), a Federação Russa possui a maior área territorial do planeta. A Federação Russa ocupa a nona posição de país mais populoso do mundo, com seus 140 milhões de habitantes. A figura 3.20 ilustra o mapa político da Federação Russa.



FIGURA 3.20 - Mapa político da Federação da Rússia (<http://pt.wikipedia.org> – Acessado em Abril/2010).

A Federação Russa dispõe de aproximadamente 102.000 km de vias navegáveis. O seu potencial de vias navegáveis só é superado pelo potencial Chinês. O maior fluxo de utilização das vias russas concentra-se na região europeia (oeste da Federação Russa), principalmente pelas características topográficas favoráveis. A

região possui aproximadamente 6.500 km de vias naturalmente navegáveis, formando a chamada UDWS (Unified Deep Water System of Rússia) e integrando-se no circuito europeu de grandes vias navegáveis de importância internacional (AGN).

A principal malha hidroviária da Federação Russa é formada pelos rios Volga, Kama, Don, Neva, e os canais Volga-Don, Volga-Báltico e Moscou, apresentado na figura 3.21. As vias comportam embarcações com capacidade de carga de até 5 mil toneladas. Além da malha hidroviária, a Federação Russa também possui uma boa infra-estrutura de transporte para integração entre os vários modais. Os vários portos fluviais possuem conexões com o sistema ferroviário. A infra-estrutura desenvolvida para a navegação de interiores na Federação Russa, conta com 126 estruturas de transposição de desnível (eclusas) e mais de 10.000 km de canais artificiais interligando rios e mares interiores (Negro, Cáspio, Asov, Báltico e Branco), o que possibilita a navegação por embarcações flúvio-marítimas.

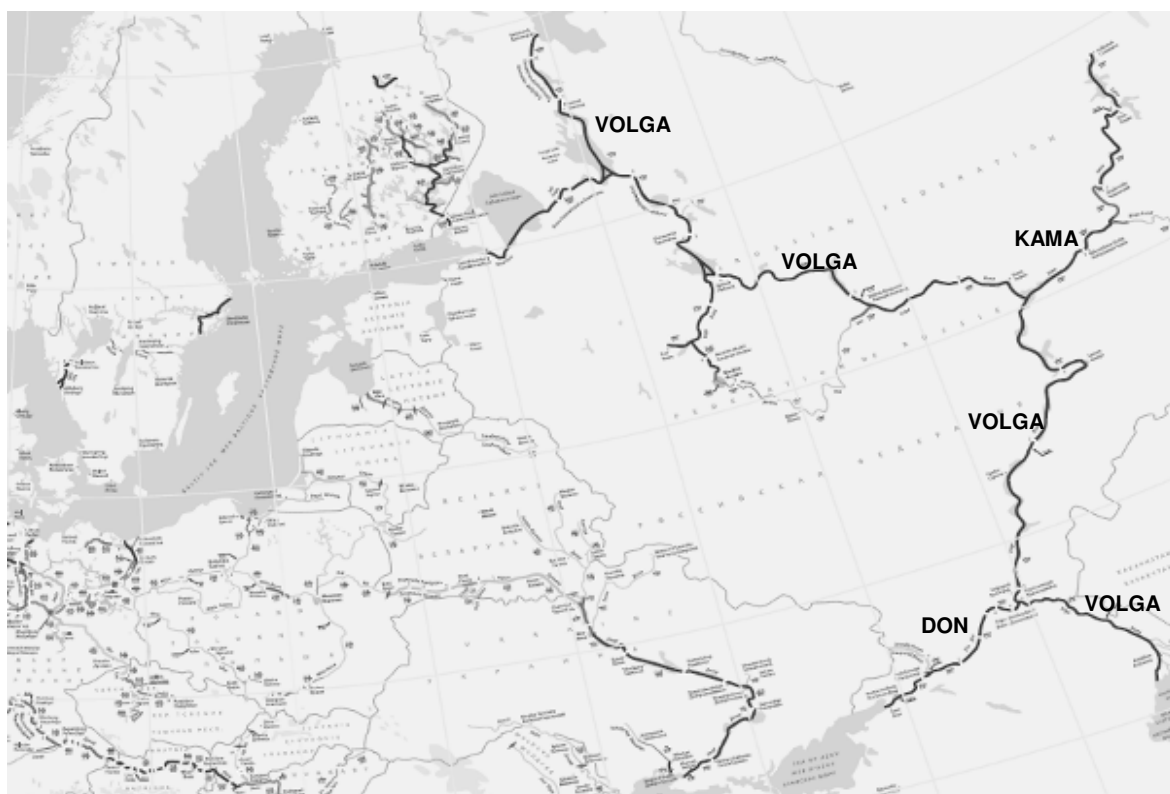


FIGURA 3.21 - Principais Hidrovias Russas – Volga, Don, Kama (<http://pt.wikipedia.org> – Acessado em Abril/2010).

O ápice no transporte de carga por via navegável na Federação Russa foi alcançado em 1988 (mais de 580 milhões de toneladas). Na década de 90 observou-se um decréscimo significativo na utilização do transporte fluvial, chegando a valores mínimos de 100 milhões de toneladas (meados da década). Desde 1999, o transporte de cargas voltou a crescer chegando a atingir 136 milhões de toneladas de carga e 30 milhões de passageiros em 2004. As previsões atuais de crescimento da economia sugerem um aumento do transporte hidroviário, com estimativa de movimentação de até 230 milhões de toneladas em 2010. A figura 3.22 retrata o histórico do transporte hidroviário de cargas na Federação Russa nas últimas duas décadas. Os dados foram obtidos através de consulta no banco de dados da divisão de transporte da UNECE.

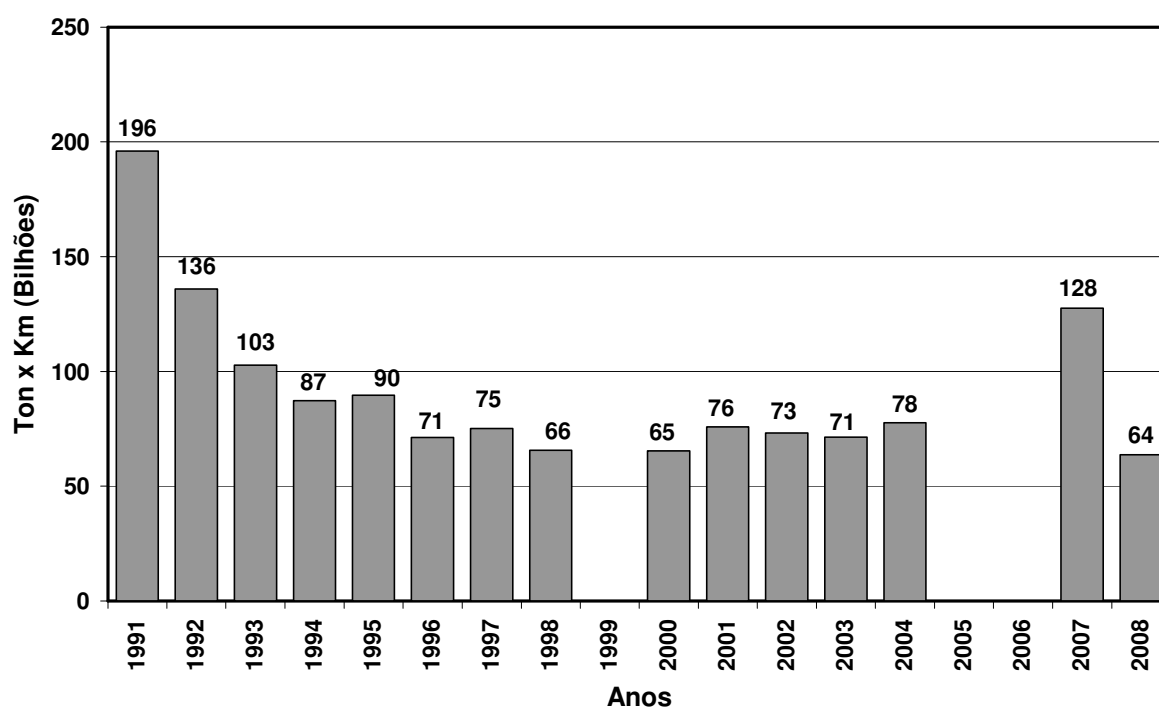


FIGURA 3.22 - Transporte anual de cargas pelas hidrovias Russas, em TkU (UNECE, 2009).

O estado da Federação Russa, desde início da década de 90, atua quase que exclusivamente na função de regulamentação e manutenção do sistema hidroviário. Do total, 90% dos serviços de transporte de carga e passageiros são exercidos pela iniciativa privada. A frota de embarcações da Federação Russa conta com

aproximadamente 29.000 embarcações, com capacidade de carga total 12,7 milhões de toneladas. A idade média da frota é de 25 anos. Observa-se uma redução de 20% nos últimos 15 anos. A renovação da frota deve tender para embarcações do tipo flúvio-marítima, para transporte direto sem a necessidade de transbordo até os portos europeus. As maiores companhias que operam no transporte russo utilizam atualmente esta estratégia de logística. Atualmente 1.100 embarcações possuem esta característica e tem transportado 30 milhões de toneladas anuais através de rios e mares. A principal vantagem deste tipo de embarcação é a baixa ociosidade. Durante o período de inverno (03 a 08 meses/ano), as vias de navegação ficam congeladas, impedindo a navegação. Neste período as embarcações realizam transporte marítimo. A capacidade média de carga destas embarcações é de 6.500 toneladas. As maiores companhias de navegação utilizam esta estratégia são elas: "Volgotanker Co." Shipping "North-West Co.", "Volga Shipping Co." e "Mar Branco – Onega Shipping Co.",

Alguns problemas devem ser contornados para possibilitar uma nova alavancagem na utilização do transporte hidroviário russo. Alguns problemas de abrangência externa, como a inexistência de normas internacionais e de segurança tem dificultado a operação, das embarcações flúvio-marítima em vários portos europeus. Outra necessidade é a adequação das taxas portuárias internacionais para transporte com essas características (trechos curtos e de alta frequência). Outra situação é o esgotamento da capacidade de tráfego das vias Volga-Báltico e Volga-Don, isto se deve ao crescimento econômico e a conseqüente orientação e direcionamento do fluxo de cargas para os portos do estuário do rio localizado em São Petersburgo e Rostov-on-Don. O volume de mercadorias transportadas neste trajeto são 17,5 a 19 milhões de toneladas por ano, respectivamente. O tempo de percurso nestas vias dobrou nos últimos 15 anos, impossibilitando o aumento da capacidade de carga transportada sem intervenção e investimentos.

3.5.7. A Navegação de Interior na República Popular da China.

A República Popular da China é um país com dimensões continentais. Com uma área total de 9.596.961 km², a República Popular da China possui a maior extensão de vias navegáveis do mundo, com 123.500 km. Esta malha hidroviária é composta por um conjunto de mais de 5.600 rios navegáveis e canais.

A maior parcela do potencial navegável da República Popular da China fica concentrada nas bacias dos rios Yangtze, Pearl e Huaihe. O Yangtze e seus tributários representam 50% do potencial navegável chinês. Com seus 58.000 km de extensão, movimenta 80% de todo transporte de carga do país. A figura 3.23 ilustra o mapa político e hidrográfico da República Popular da China.



FIGURA 3.23- Mapa político e hidrografia da Republica Popular da China (<http://pt.wikipedia.org> – Acessado em Abril/2010).

A infra-estrutura portuária da Republica Popular da China é composta por mais de 2.000 portos fluviais, 800 estruturas de transposição e canais de navegação artificial.

O grande canal (Pequim-Hangzhou), com uma extensão navegável de 1.776 km, é o maior canal artificial para navegação do mundo, e o mais importante do sistema chinês. As construções das primeiras seções do grande canal datam do período de 722-481 AC. O grande canal, tal como o vemos hoje foi em grande parte, uma criação da Dinastia Sui no período de 581-618 DC.

Nas últimas duas décadas a Republica Popular da China priorizou investimentos no setor de transportes, principalmente na navegação de interiores. Durante o período de 1996 a 2000 a Republica Popular da China investiu 2,15 bilhões de euros na construção e modernização de 240 portos. Destes 159 estão localizados ao longo do rio Yangtze. Atualmente a Republica Popular da China possui mais de 2000 portos de navegação interior. Deste total, 85 possuem estrutura para receber embarcações com carga de até 10.000 toneladas de capacidade de movimentação de mais 10 milhões de toneladas/ano. O governo chinês também investiu recursos na ampliação e construção de novos trechos de canais artificiais para navegação, principalmente o trecho leste, iniciado oficialmente em 2002, com previsão de conclusão em 2012.

Outro investimento importante para a economia chinesa é a construção da UHE de Três Gargantas, que além do significativo acréscimo de geração hidrelétrica para o país, possibilitou com a elevação do nível de montante, com superação de diversos obstáculos naturais como corredeiras e bancos de areia. A obra possibilitou a ampliação da navegação de embarcações de grande porte, com maior capacidade de carga em um trecho de aproximadamente 430 km a montante. O resultado dos investimentos chineses no setor de navegação de interior pode ser observado através da evolução do crescimento das vias navegáveis e do total de carga transportada anualmente, figuras 3.24 a 3.26.

Atualmente a frota de navios que operam nas vias navegáveis de interior da Republica Popular da China são da ordem de 231.000 embarcações, com capacidade total de carga de 20,67 milhões e de 780 mil passageiros.

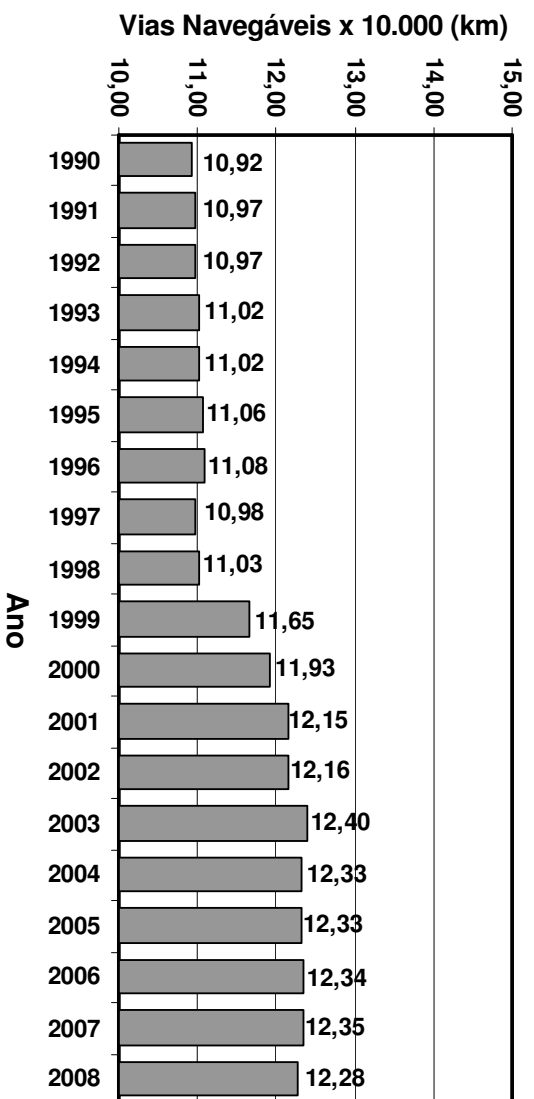


FIGURA 3.24- Crescimento da malha hidroviária da R.P. China (National Bureau of Statistics of China, 2009).

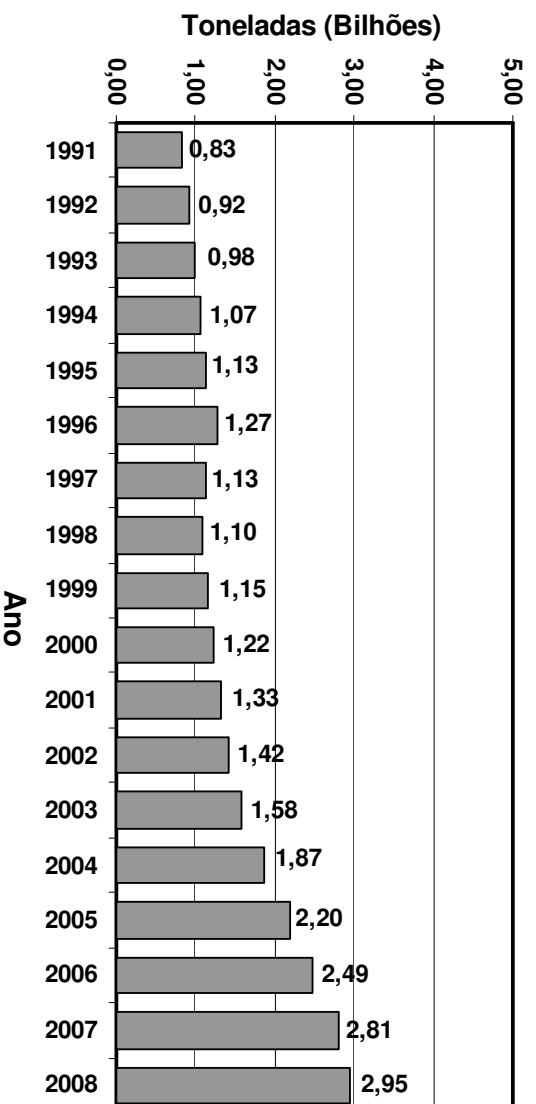


FIGURA 3.25 - Transporte anual de cargas (ton) pelas hidroviás da R.P. China (National Bureau of Statistics of China, 2009).

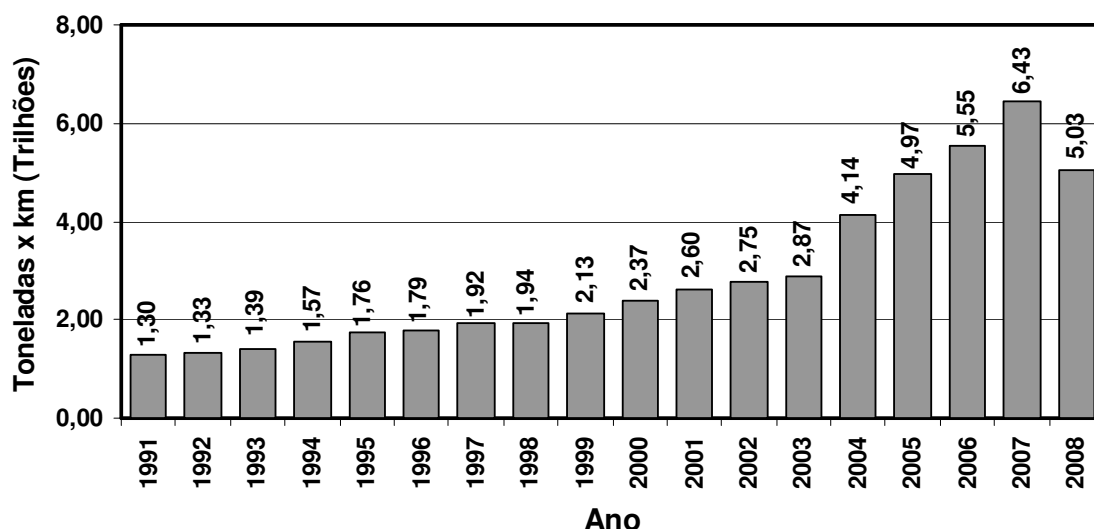


FIGURA 3.26 - Transporte anual de cargas (TkU) pelas hidrovias da R.P. China (National Bureau of Statistics of China, 2009).

3.5.8. A Navegação de Interior na Índia.

A Índia possui um potencial total de vias navegáveis da ordem de 15.544 km. Deste total, apenas 5.700 km (37%), são utilizados intensamente para fins econômicos. Em 1986, foi constituída a Autoridade da Índia para Navegação de Interiores (IWAI), com o objetivo de maximizar o desenvolvimento da navegação de interior no país.

O governo Indiano reconheceu 05 vias, como sendo vias navegáveis nacionais. A primeira via nacional foi declarada em 1986, e refere-se ao trecho de 1.620 km, localizado entre Haldia e Allahabad nos rios Ganga-Bhagirathi-Hooghly.

Em 1988, foi declarada a segunda via navegável nacional, referente ao trecho de 891 km, localizado entre Sadiya e Dhubri, nos rios Brahmaputra. O Canal da Costa Oeste, a partir de Kottapuram Kollam, incluindo os canais de Chamakara e Udyogmandal, totalizando 205 km, foi declarado em 1993 como sendo a terceira via de

navegação nacional da Índia. A quarta e quinta via nacional de navegação foram declaradas em 2008 e encontram-se em fase de obras. A quarta via compreende 1.027 km entre os canais de Kakinada e Puducherry, nos rios Godavari e Krishina. A quinta via, com 588 km de extensão pela costa leste, interligando o rio Brahmani e o Delta do rio Mahanadi. A previsão para conclusão das obras das vias NW-04 (quatro) e NW-05 (cinco) é de 07 (sete) anos, ou seja, 2015.

Os investimentos alocados pelo governo em infra-estrutura na área hidroviária, tem resultado em aumento significativo da movimentação de carga no final da última década, conforme resultados apresentados nos gráficos das figuras 3.27 e 3.28. A figura 3.29 apresenta a localização das hidrovias nacionais indianas.

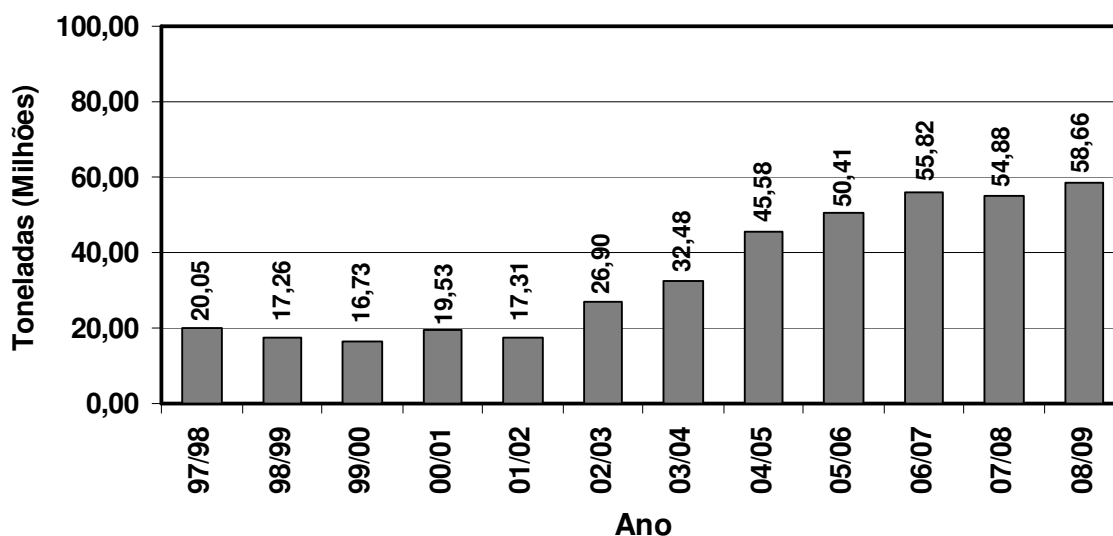


FIGURA 3.27 - Transporte anual de cargas (ton) pelas hidrovias da Índia (IWAI, 2009).

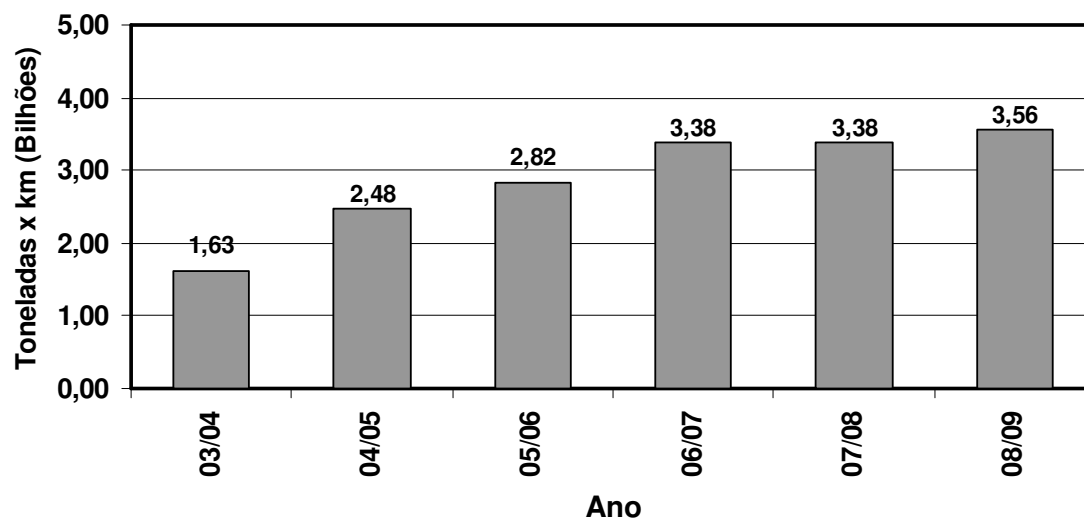


FIGURA 3.28 - Transporte anual de cargas (TkU) pelas hidrovias da Índia (IWAI, 2009).

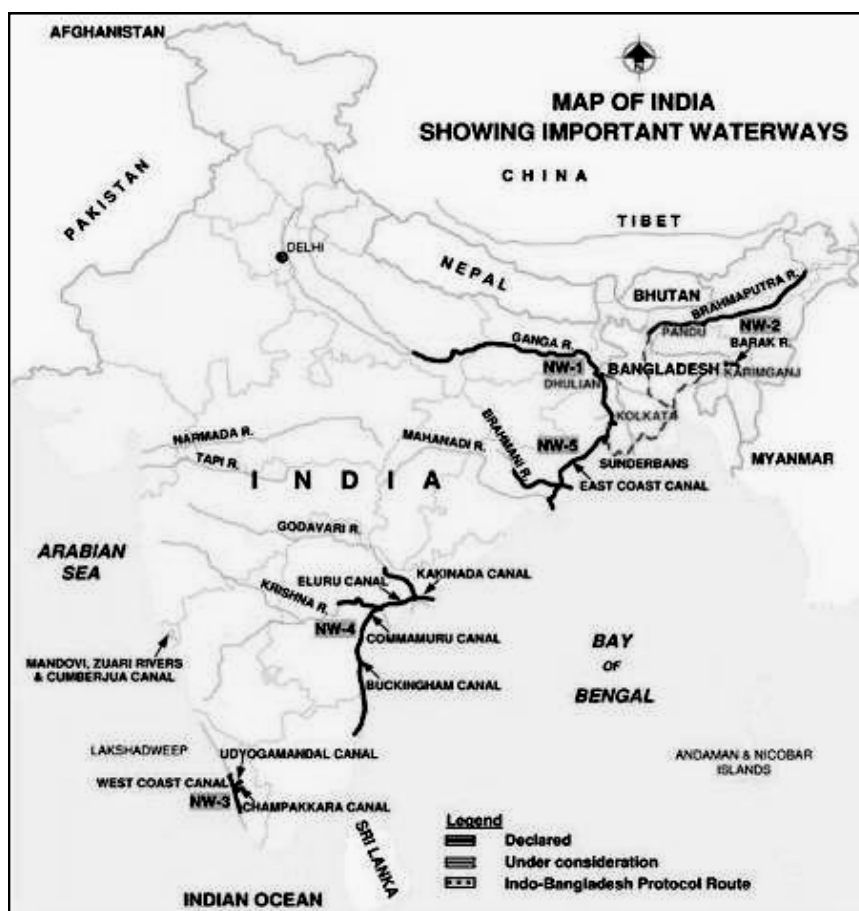


FIGURA 3.29 - Mapa de Localização das Hidrovias na Índia (IWAI, 2009).

3.5.9. A Navegação de Interior no Brasil.

O Brasil possui uma área territorial de 8.514.876,599 km², sendo 0,65% desta formada por espelho d'água de lagos e rios. A população total é de 193,0 milhões de habitantes. O PIB anual é de U\$ 1,95 trilhões de dólares (IBGE, 2010).

Segundo a Agência Nacional de Transporte Aquaviários – (ANTAQ 2009), o Brasil possui um potencial de navegabilidade em águas superficiais flúvio-lacustre de aproximadamente 63 mil quilômetros (navegação de costa, e de interior). A rede hidrográfica nacional (navegação de interior) esta subdividida em nove bacias e conta com aproximadamente 44 mil quilômetros de rios. Destes 29 mil já são naturalmente navegáveis, sem a necessidade de realização de obras de dragagem ou transposição. Atualmente são utilizados apenas 13 mil km economicamente.

A vocação das hidrovias brasileiras é o transporte de commodities, como grãos, minérios e insumos, como fertilizantes, combustíveis e outros produtos. Esse fato facilita a formação de pólos comerciais e industriais localizados às suas margens, atuando de forma integrada com os demais modais que venham a complementar o transporte fluvial. A figura 3.30 apresenta o mapa com a localização das bacias, principais hidrovias e administrações hidroviárias, segundo o plano nacional de viação.



FIGURA 3.30 - Hidrovias do Brasil (ANA, 2007).

A Navegação de Interior do Brasil é carente de um centro unificado de informações estatísticas sobre a movimentação de carga. A última informação

consolidada no âmbito nacional é o relatório estatístico anuário (1998/1999/2000), disponível no site do Ministério dos Transportes. As informações estão apresentadas na tabela 3.8.

A frota de embarcações das empresas autorizadas pela ANTAQ (Agência Nacional de Transportes Aquaviários) para operar na navegação interior é composta por 1.148 embarcações. A capacidade total de transporte destas embarcações é de 890.794,96 toneladas. A idade média da frota é de 17 anos (2008).

TABELA 3.8 - Movimentação de cargas Hidrovias Brasileiras (MT, 2000).

HIDROVIAS	Movimentação 1998 (t)	Movimentação 1999 (t)	Movimentação 2000 (t)
Bacia Amazônica Amazônia Ocidental	3.036.656,00	3.047.624,00	4.246.636,00
Bacia Amazônica Amazônia Oriental	13.394.075,00	15.379.431,00	13.718.530,00
Bacia do Nordeste	0,00	0,00	187.180,00
Bacia do São Francisco	47.238,00	65.610,00	58.766,00
Bacia do Tocantins Araguaia	2.400,00	2.400,00	2.400,00
Bacia do Paraguai	2.155.574,00	2.053.449,00	1.911.326,00
Bacia do Tietê Paraná	1.722.677,00	1.740.159,00	1.531.920,00
Bacia do Sudeste	544.663,00	503.418,00	407.139,00
Total	20.903.283,00	22.792.091,00	22.063.897,00

Distância Média de 1350 km x 23,0 Milhões de toneladas/ano = 31,05 Bilhões TkU/ano. (Fonte Ministério dos Transportes-2010)

As informações dos principais sistemas hidroviários do mundo, incluindo aspectos físicos, geográficos e econômicos dos seus respectivos países foram consolidados na tabela 3.9, apresentada a seguir.

TABELA 3.9 - Tabela Resumo – Principais Hidrovias no Mundo.

Países	Área Geográfica (Km²)	População Habitantes	PIB (Mil) US\$	Hidrovia	
				Extensão Km	TkU Bilhões
Federação Russa	17.075.400	140.873.647	1.289.582	102.200,0	64,00
Rep. Popular da China	9.596.961	1.345.750.973	3.400.351	123.500,0	5.030,00
EUA	9.363.520	314.658.780	13.776.472	40.700,0	472,00
Brasil	8.514.876	193.733.795	1.314.199	13.000,0	31,00
Índia	3.287.590	1.198.003.27	1.141.346	5.700,0	3,56
União Européia (EU27)	4.339.245	496.203.141	16.776.617	42.709,0	145,27
Áustria	83.853	8.363.882	373.327	351,0	2,36
Bélgica	30.519	10.646.804	454.580	1.532,0	8,75
Bulgária	110.912	7.544.581	39.551	470,0	2,89
Chipre	9.251	871.036	21.275	-	-
Rep. Tcheca	78.864	10.368.946	171.953	664,0	0,03
Alemanha	356.733	82.166.671	3.317.377	7.309,0	64,06
Dinamarca	43.077	5.470.293	311.596	-	-
Estônia	45.100	1.340.263	21.275	320,0	-
Grécia	131.990	11.161.335	313.355	6,0	-
Espanha	504.782	44.903.659	1.436.893	70,0	-
Finlândia	338.145	5.325.587	244.692	9.677,0	0,08
França	551.500	62.342.668	2.545.696	5.372,0	8,90
Hungria	93.032	9.992.662	138.183	1.440,0	2,25
Irlanda	70.284	4.515.450	256.074		
Itália	301.268	59.870.123	2.095.141	1.562,0	0,08
Lituânia	65.200	3.286.547	38.332	425,0	0,01
Luxemburgo	2.586	486.184	50.489	37,0	0,37
Rep. Letônia	64.500	2.249.362	27.166	12,0	-
Malta	316	408.712	7.411	-	-
Holanda	40.844	16.592.232	766.251	6.215,0	45,30
Polônia	323.250	38.073.745	419.205	3.638,0	0,28
Portugal	92.389	10.707.130	222.982	124,0	-
Romênia	237.500	21.274.730	161.279	1.779,0	8,69
Suécia	449.964	9.249.249	454.792	390,0	-
Eslovênia	20.251	2.020.125	45.908	-	-
Rep. Eslováquia	49.035	5.405.743	73.852	251,0	1,10
Reino Unido	244.100	61.565.422	2.767.982	1.065,0	0,15

3.5.10. A Gestão da Navegação no Brasil.

Conforme mencionado pela Agência Nacional de Águas (2009), a gestão e administração da infra-estrutura hidroviária sofreu mudanças significativas nas últimas décadas, através da extinção e criação de departamentos, autarquias e agências para gestão da infra-estrutura de transporte nacional.

O Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis – DNPVN autarquia do Ministério dos Transportes, responsável pelas vias navegáveis, foi extinto em 1976. O DNPVN foi substituído pela então criada Empresa de Portos do Brasil S/A – PORTOBRÁS, a quem foi delegada, temporariamente, as atribuições relacionadas à gestão das vias navegáveis de interiores.

A PORTOBRÁS foi extinta em 1993, através da Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001 e regulamentada pelo Decreto nº 4.749/2003, reestruturando o setor de transporte aquaviário e terrestre. Foram então criados: o CONIT (Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte), a ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres), a ANTAQ (Agência Nacional de Transportes Aquaviários) e o DNIT (Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes).

O CONIT, vinculado à Presidência da República tem a atribuição de propor ao Presidente da República políticas nacionais de integração dos diferentes modais de transporte, pessoas e bens. Já a ANTT e a ANTAQ têm como objetivo principal implementar em suas respectivas esferas de atuação, as políticas formuladas pelo CONIT e pelo Ministério dos Transportes, bem como regular ou supervisionar as atividades de prestação de serviços e de exploração da infra-estrutura de transportes, exercidas por terceiros.

A ANTAQ atua nas esferas da navegação fluvial, lacustre, travessias, apoio marítimo, apoio portuário, de cabotagem e de longo curso, nos portos organizados, dos

terminais portuários privativos e do transporte aquaviário de cargas especiais e perigosas. Compete a essa Agência, dentre outras atividades:

a) A promoção de estudos específicos de demanda de transporte aquaviário e de serviços portuários.

b) Promover estudos aplicados às definições de tarifas, preços e fretes, em confronto com os custos e benefícios econômicos transferidos aos usuários pelos investimentos realizados.

c) Propor ao Ministério dos Transportes o plano geral de outorgas de exploração da infra-estrutura aquaviária e portuária.

d) A prestação de serviços de transporte aquaviário. Elaborar e editar normas e regulamentos relativos à prestação de serviços de transporte e à exploração da infra-estrutura aquaviária e portuária, garantindo a isonomia no seu acesso e uso.

e) Assegurar o direito dos usuários;

f) Fomentar a competição entre os operadores;

Em 20/12/2004 a ANTAQ aprovou a Resolução 356, estabelecendo normas para outorga de autorização para exploração dos serviços de transporte de carga na navegação interior de percurso longitudinal.

O DNIT tem a função de implementar a política formulada para a administração da infra-estrutura do Sistema Federal de Viação, sob a jurisdição do Ministério dos Transportes, para as vias navegáveis, ferrovias, rodovias federais, instalações, vias de transbordo, interface intermodal e instalações portuárias. Compreendendo sua operação, manutenção, restauração, reposição, adequação de capacidade e ampliação mediante construção de novas vias e terminais.

A administração das hidrovias é realizada pelas Administrações Hidroviárias, órgãos que possuem duplo comando: institucionalmente são subordinadas ao DNIT, mais especificamente ao seu Departamento de Infra-Estrutura Aquaviária, e gerencialmente às Companhias Docas no âmbito de suas respectivas jurisdições. A elas compete, principalmente, promover e desenvolver as atividades de execução, acompanhamento e fiscalização de estudos, obras e serviços de hidrovias, dos portos fluviais e lacustres que lhe venham a ser atribuídos pelo Departamento de Infra-estrutura Aquaviária. A figura 3.31 mostra a área de atuação e jurisdição de cada administração hidroviária, sendo atualmente em número de oito:

- AHIPAR - Administração da Hidrovia do Paraguai, com sede em Corumbá-MS.
- AHITAR - Administração da Hidrovia do Tocantins/Araguaia, com sede em Goiânia-GO.
- AHIMOR - Administração da Hidrovia da Amazônia Oriental, com sede em Belém-PA.
- AHIMOC - Administração da Hidrovia da Amazônia Ocidental, sede em Manaus-AM.
- AHSFRA - Administração da Hidrovia do São Francisco, com sede em Pirapora-MG;
- AHINOR - Administração da Hidrovia do Nordeste, com sede em São Luís-MA.
- AHSUL - Administração da Hidrovia do Sul, com sede em Porto Alegre-RS.
- AHRANA - Administração da Hidrovia do Paraná, com sede em São Paulo-SP.



FIGURA 3.31 - Administrações Hidroviárias do Brasil (DNIT, 2010).

3.5.11. Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT)

O Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT) foram desenvolvidos pelo Ministério dos Transportes, em cooperação com o Ministério da Defesa, através do Centro de Excelência em Engenharia de Transportes (CENTRAN).

O objetivo do PNLT é subsidiar o planejamento e investimento na infraestrutura de transporte a médio e longo prazo, de forma a contribuir para a consecução das metas econômicas, sociais e ecológicas do País, rumo ao desenvolvimento sustentado.

A estratégia para a infra-estrutura de transporte é a ênfase no desenvolvimento dos transportes: hidroviário e ferroviário em detrimento do rodoviário. Esta estratégia

busca reduzir custos e aumentar eficiência e competitividade do Brasil no mercado globalizado. O cenário traçado até (2025) prevê a ordem de investimento de R\$ 12,8 bilhões de reais para o sistema hidroviário, conforme apresentado na tabela 3.10. Este investimento deve resultar em um acréscimo de 123% na participação do modal hidroviário no transporte nacional. O sistema Hidroviário passará a responder por 29% de toda movimentação de carga, conforme gráfico apresentado na figura 3.32. A distribuição temporal dos recursos de investimento foi sugerida pelo PNLT conforme figura 3.33.

TABELA 3.10 - Investimento em transporte recomendado pelo PNLT (PNLT, 2007).

Modo de Transporte	Extensão (km)/ Quantidade (no.)	Recursos (Milhões R\$)	Participação no Investimento (%)
Rodoviário	43.203	74.194	43,00
Ferrovário	20.256	50.556	29,40
Hidroviário	14.489	12.807	7,40
Portuário	169	25.162	14,60
Aeroportuário	40	9.695	5,60
Total		172.414	100

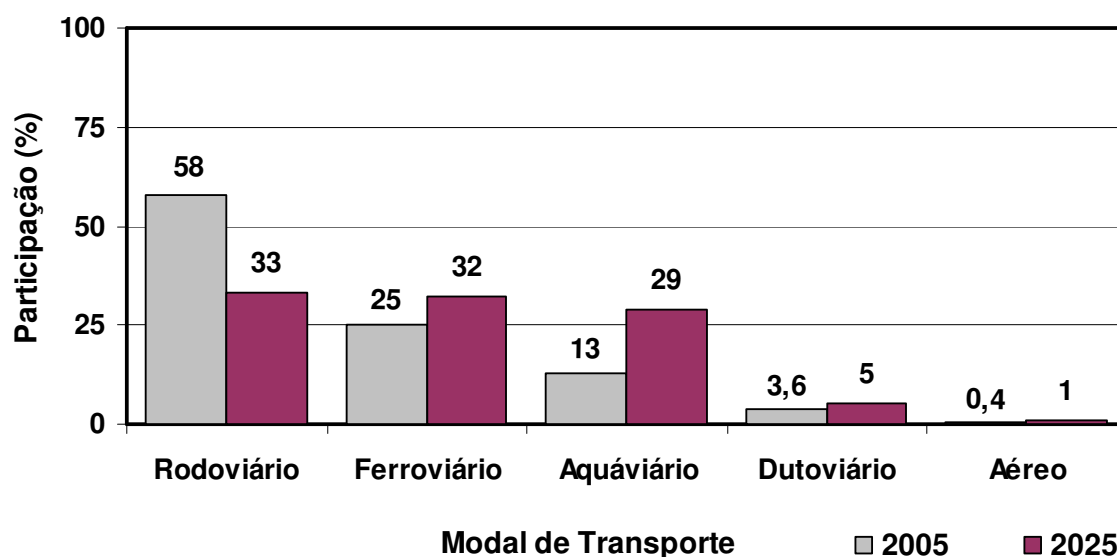


FIGURA 3.32 - Plano para desenvolvimento e equilíbrio modal (PNLT, 2007).

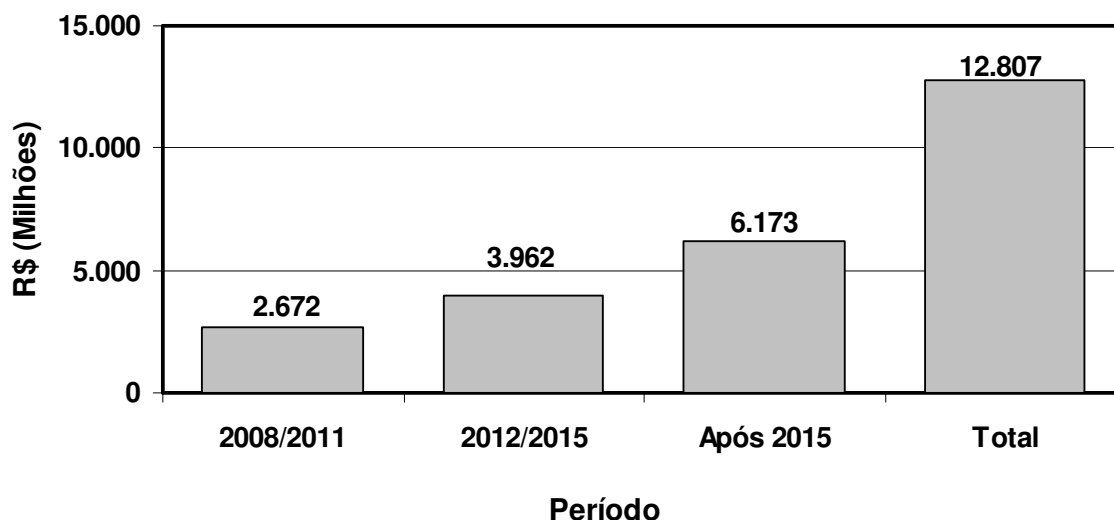


FIGURA 3.33 - Plano de Investimento para o setor hidroviário (PNLT, 2007).

3.6. Estruturas de Transposição de Desnível.

As estruturas de transposição de desnível ou eclusas são estruturas que possibilitam as embarcações superarem obstáculos naturais de vias potencialmente navegáveis, como corredeiras, cachoeiras, etc.

Segundo Fernandes (2001), as estruturas de transposição podem ser classificadas em duas grandes categorias: Estruturas Hidráulicas (utilizam princípios hidráulicos para movimentação da embarcação) e Equipamentos de Ascensão Mecânicos.

As estruturas de transposição hidráulicas foram muito mais difundidas em relação às estruturas mecânicas principalmente pelas facilidades construtivas, simplicidade operacional e baixo custo. Estima-se que foram construídas mais de 3.000

obras de transposição hidráulica no mundo, onde pelo menos 2.500 encontra-se em operação, segundo Fernandes (2001).

A utilização de estruturas de transposição mecânica justifica-se apenas pela baixa disponibilidade de recurso hídrico, maior rapidez ou outra especificidade técnica. Historicamente o número de estruturas com este tipo de tecnologia, não ultrapassam a duas centenas. Fernandes (2001) apresenta os diagramas (figuras 3.34 e 3.35), como elemento de classificação das estruturas de transposição segundo as duas grandes categorias (Mecânica e Hidráulica).

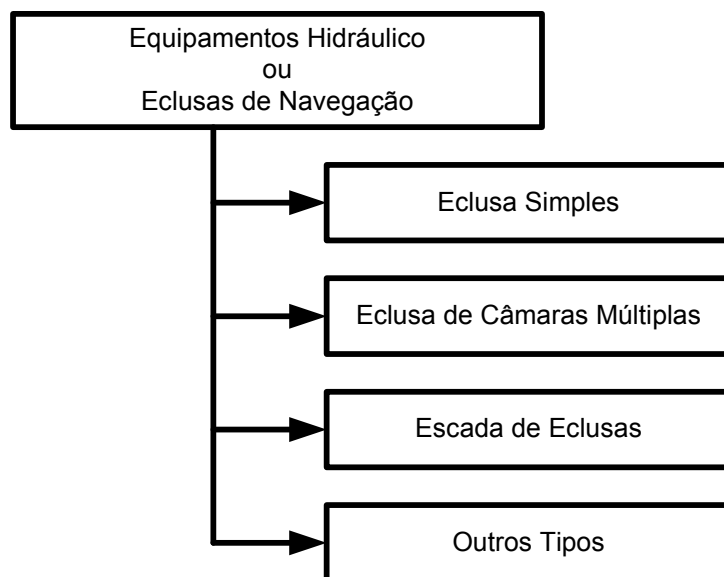


FIGURA 3.34 - Classificação das Eclusas de Navegação (Fernandes, 2001).

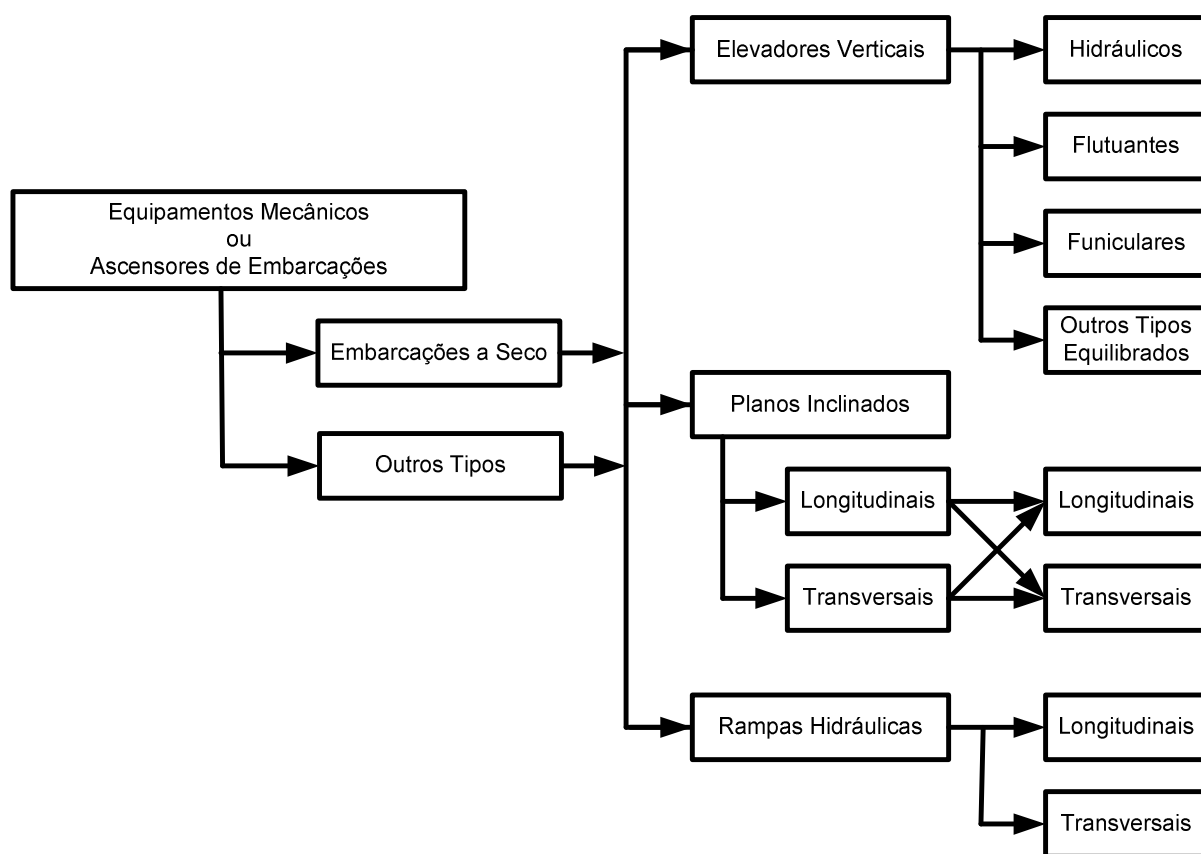


FIGURA 3.35 - Classificação dos Ascensores das Embarcações (Fernandes, 2001).

3.6.1. Estruturas de Transposição Hidráulica (Eclusas).

Conforme Malaquias (2004), as primeiras eclusas surgiram em Flandres, Holanda, no século XII. Estrutura constituída por uma câmara com portas em cada extremidade que possibilitavam a passagem da embarcação de um nível de água para outro. O primeiro projeto conhecido de uma “moderna” eclusa foi encontrado numa coletânea de esboços denominada: “Codex Atlanticus”, elaborado por Leonardo da Vinci (1452-1519). Esse esboço, reproduzido na figura 3.36 ilustra uma porta de acesso dotada de um sistema de controle do fluxo de água por uma comporta menor. O

princípio de funcionamento destes componentes é o mesmo utilizado nas eclusas atuais.

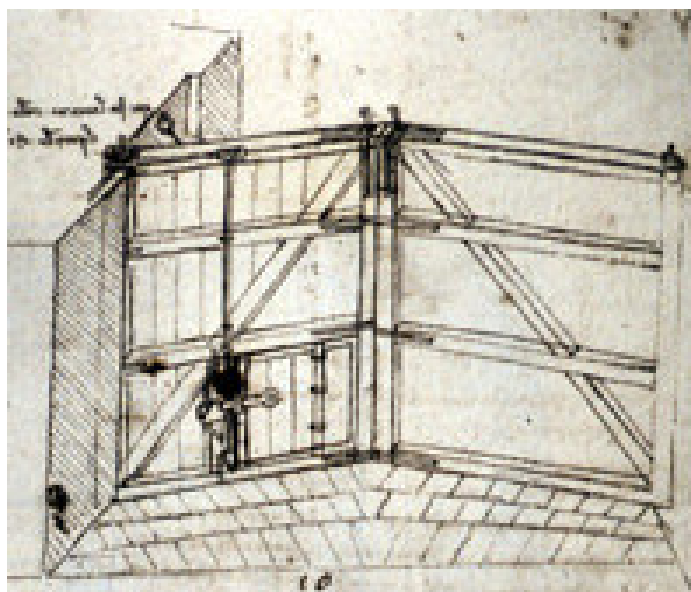


FIGURA 3.36 - Projeto de Porta de Eclusa – Leonardo da Vinci (Malaquias, 2004).

As eclusas hidráulicas podem ser classificadas em: Câmara Simples, Câmaras Múltiplas ou Escadas de Eclusa. A determinação do tipo depende de fatores técnicos e econômicos, como a diferença de nível a serem vencidas, restrições hidráulicas, volume de tráfego, viabilidade econômica, etc.

Desníveis elevados conduzem para adoção de um sistema de escadas de eclusas ou de câmaras múltiplas. A opção de utilização de eclusa de câmara simples ou dupla, está associada a estudos de viabilidade, demanda e recursos. A experiência chinesa, como país que possui a maior quantidade de eclusas, adota a queda como principal referência para determinação do lay-out. Utiliza-se eclusa de câmara simples para desnível menor que 20 m, para desnível situado entre a faixa de 20 a 40 m adotam-se eclusas de câmara simples ou dupla. Para desnível acima de 40 m adota-se a sequência de eclusas ou escadas de eclusas (ESCAE -1997).

O Corps of Engineers (EUA) classifica as eclusas em decorrência da queda. Estruturas com até 10 m de desnível são consideradas de baixa queda. De média queda as estruturas com desnível entre 10 a 15 m e de alta queda as eclusas com desnível acima de 15 m. Segundo Fernandes (at. al. apud. PIANC - 1985), sob o ponto de vista do limite hidráulico, as eclusas de alta queda bem sucedidas operacionalmente apresentam desnível situado entre a faixa de 35 a 40 m.

Os principais elementos que compõem uma eclusa são: canais de aproximação, muros guias, portas de montante e jusante, câmara de eclusagem, tomada d' água, circuito hidráulico de adução, circuito hidráulico de distribuição, circuito hidráulico de descarga, válvulas de adução, válvulas de descarga e canal de descarga.

A câmara das eclusas fluviais modernas adota o formato paralelepípedo, com relação entre a largura/comprimento de 1:6 ou 1:12. Já os circuitos de distribuição para enchimento/esvaziamento da câmara são do tipo orifício instalados na soleira. Esta concepção permite maior estabilidade contra transientes hidráulicos, maior tranquilidade da superfície líquida e conseqüente segurança durante o processo de eclusagem.

As portas usualmente utilizadas à montante para eclusas de média e alta queda são a do tipo Busco (ou de Batente), cuja invenção é atribuída a Leonardo da Vinci. Composta por duas folhas planas, com eixo vertical. Na posição fechada as folhas se encontram formando um ângulo para montante, distribuindo os esforços para os muros alas e batente de soleira. Outros tipos de portas possíveis são: do tipo plana de movimentação vertical (porta vagão), porta setor, segmento, basculante, plano-corrediça, cilíndrica horizontal, etc. A porta de jusante ficam restritas basicamente ao tipo busco e plana de movimentação vertical.

As válvulas de adução e descarga geralmente podem ser do tipo cilíndrico, gaveta, borboleta, de segmento invertido, etc.

O processo de eclusagem é bastante simples. Após o acesso da embarcação na câmara da eclusa (por montante ou jusante), são realizados os procedimentos de segurança (amarras, alinhamento da embarcação, verificações de EPIs e demais procedimentos de segurança), a porta do acesso é fechada iniciando-se o processo de eclusagem. O nível da câmara é equalizado com o nível de Montante ou Jusante,

através da operação das válvulas de adução/descarga. Após equalização de nível a respectiva porta de montante ou jusante é aberta, possibilitando a saída da embarcação. Através da figura 3.37 é possível identificar de forma simplificada os principais elementos de uma eclusa de câmara simples, Malaquias (2004).

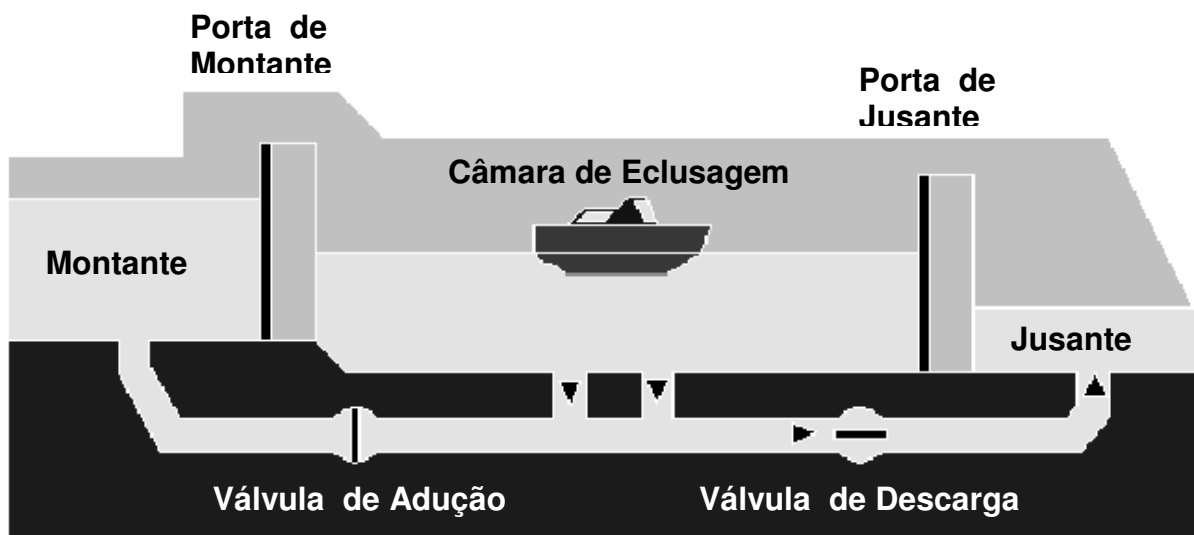


FIGURA 3.37 - Lay-Out de uma Eclusa simples, (modificado de Malaquias, 2004).

3.6.2. Capacidade de Tráfego em Eclusa.

A capacidade máxima de transporte de uma hidrovía (CMT) é definida como sendo a máxima capacidade de carga possível de ser transportada por unidade de tempo. Em hidrovias que possuem estruturas de transposição de desnível, a capacidade máxima de tráfego acaba sendo imposta pela estrutura mais “lenta”.

A Capacidade Máxima de Transporte de uma hidrovía é um valor teórico e acaba não refletindo a realidade operacional da via, sendo influenciada por vários outros fatores, inclusive fatores externos, como por exemplo, fatores relativos a armazenamento. Desta forma, em uma hidrovía real, devido a influencias de restrições

de origem interna ou externa, uma via nunca atinge a capacidade máxima de transporte.

Já a Capacidade Efetiva de Transporte (CET), representa o resultado real de uma operação normal e de “utilização econômica de uma hidrovia”. A relação entre o CET e CMT é denominado “Coeficiente de Utilização”,

A expressão matemática (2) representa o número total de embarcações (comboios ou conjunto de embarcações), que podem passar através da eclusa em um ano (Fernandes-2004):

$$N = \frac{525.000}{\bar{T}} \dots\dots\dots (2)$$

Onde:

N - Número Máximo de Eclusagens que pode passar por uma eclusa em um determinado tempo.

$\bar{T}$ - Tempo médio de Transposição (em Minutos);

525.000 - Número de minutos referentes ao período de um ano;

Logo:

$$CMT = NW = \frac{525.000}{\bar{T}} * W \dots\dots\dots (3)$$

Onde:

N - Número máximo de eclusagens que pode passar por uma eclusa em um determinado tempo.

$\bar{T}$ - Tempo médio de transposição (em minutos);

525.000 - Número de minutos referentes ao período de um ano;

W - Capacidade de carga de cada embarcação;

Para eclusas simples com passagens alternadas, o tempo de eclusagem deve ser obtido através da equação (4), que é um somatório dos vários tempos necessários para o processo.

$$T_t = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 \dots (4)$$

Onde:

T_t - Tempo Total de Eclusagem;

T_1 - Tempo de Acesso a Câmara;

T_2 - Tempo de Fechamento da Porta;

T_3 - Tempo de Deslocamento Vertical;

T_4 - Tempo de Abertura da Porta de Saída;

T_5 - Tempo da saída da obra de transposição;

Segundo registros, o tempo médio de eclusagem é de 30 a 40 minutos para eclusas de alta queda (Fernandes, 2001).

A determinação do CET (Capacidade Efetiva de Transporte) deve considerar quatro fatores, denominados E_1 , E_2 , E_3 e E_4 , conforme equação (5). Estes coeficientes são obtidos de estatísticas de tráfego em vias existentes ou por estimativas em comparação com vias semelhantes (Fernandes, 2001).

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \dots\dots\dots(5)$$

Onde:

E_1 - Coeficientes relativos ao tempo real em que a obra é operada;

E_2 - Coeficiente de eficiência relativo ao tempo de transposição;

E_3 - Coeficiente de eficiência relativo ao aproveitamento da área da câmara;

E_4 - Coeficiente de eficiência relativo à capacidade de carga;

A tabela 3.11 apresenta os coeficientes de eficiência verificados para as estruturas norte-americanas e européias.

TABELA 3.11 - Coeficiente de Eficiência das Hidrovias EU e EUA (CESP, 1985).

Hidrovias	E	E_1	E_2	E_3	E_4
Norte-Americana	0,34	0,90	0,90	0,75	0,57
Européia	0,17	0,34	0,85	0,52	0,34

3.6.3. Consumo de água na Operação de Eclusas.

Aplicável para as eclusas de operação hidráulicas (câmaras simples, duplas, múltiplas ou em escada), que utilizam a água como única fonte de energia para o processo de transposição de nível. Considera-se o consumo de água, todo volume de água necessário para realização do processo de eclusagem.

Para sistema isolado, como canais ou eclusas exclusivas para a navegação, o “custo” da água pode ser desprezível desde que a vazão seja suficiente para alimentação do processo. Para empreendimentos de aproveitamento múltiplo, o custo da água utilizado na operação das eclusas deve ser contabilizado em termos energéticos. Mesmo na ausência de capacidade de geração, o volume consumido deve ser quantificado como energia potencial. O volume de água utilizado no processo de eclusagem pode ser calculado de modo análogo ao cálculo da capacidade de tráfego, segundo Fernandes (2001). Considera-se como Gasto Máximo Teórico (G_{at}), para um fluxo regular de eclusagens. Neste caso admiti-se o nível da câmara, como constante durante o período. A equação (6) representa a equação para cálculo do consumo máximo teórico (G_{at}):

Logo:

$$G_{at} = K \times V \times N \dots\dots\dots (6)$$

Onde:

N - Número Máximo de transposições previstas por ano.

V - Volume máximo d’ água necessário para encher a câmara;

K - Coeficiente

Obs. Para eclusa simples, $K=1$ (passagens alternadas);

Para eclusa com passagens sucessivas no mesmo sentido:

$$K = \frac{2 \times \alpha - 1}{2 \times \alpha} \dots\dots\dots (7)$$

Onde:

α - Representa o coeficiente de passagens pela câmara.

A determinação do Gasto Efetivo de Consumo pode ser determinada através da multiplicação de um coeficiente de utilização (D) sobre o (G_{at}), que leva em consideração diversos fatores, conforme apresentado na equação (8):

$$D = E_1 \times E_2 \times D_1 \times D_2 \dots\dots\dots (8)$$

Onde:

E_1 - Coeficientes relativos ao tempo efetivo de utilização da eclusa;

E_2 - Coeficiente relativo ao tempo efetivo de transposição;

D_1 - Irregularidades do fluxo de embarcações;

D_2 - Volume efetivo de cada eclusagem;

3.7. Modelo de Otimização e Simulação em Recursos Hídricos

3.7.1. Estado da arte.

O objetivo deste capítulo é apresentar um breve histórico sobre trabalhos que utilizaram técnicas de otimização e ou simulação aplicados para problemas de recursos hídricos similares ao proposto neste trabalho e que vieram a contribuir com a evolução dos modelos utilizados atualmente.

Braga et. al (1998), define modelos de otimização como algoritmos matemáticos que procuram identificar os pontos máximos e mínimos da chamada função objetivo, que esta representando através de uma expressão matemática os objetivos estabelecidos na operação. No mesmo trabalho Braga et al. (1998) define modelos de simulação como um conjunto de expressões matemáticas estruturadas em seqüência lógica, que descrevem a operação do sistema no espaço e no tempo, com objetivo de representar e operar o sistema de forma mais detalhada possível, fornecendo informações para avaliação do comportamento do sistema real.

A utilização de modelos de otimização aplicados na solução de problemas em recursos hídricos teve início no século XX. Em 1923 Varlet apud Lund (2008), utilizou de ferramentas de otimização matemática para controle de inundações e abastecimento de água. Em 1946 Massé apud Lund (2008), empregou a otimização na operação de Usinas Hidrelétricas.

Os modelos de otimização tiveram maior destaque após a metade do século XX, no término da 2ª. Guerra Mundial, com o desenvolvimento da área de Pesquisa Operacional e da crescente expansão demográfica e pela necessidade de recursos.

Neste cenário vale destacar o início das construções das usinas hidrelétricas do rio Tietê (década de 50), reflexo de uma concepção da década de 40, pela exploração do uso múltiplo da cascata do rio Tietê. Neste projeto foi incluído o aproveitamento para navegação, com a construção das eclusas conjuntamente com o programa energético do estado de São Paulo.

Francato (1997) apresentou modelo de otimização para operação de sistemas hidroelétricos, constituído por um algoritmo de programação linear, o qual era acionado na forma de iterações sucessivas, de tal forma a contornar as não linearidades presentes no problema. O modelo foi testado no sistema de reservatórios dos rios Paranaíba, Paranapanema e Grande, todos na região sudeste brasileira.

Braga, Barbosa, e Barros (1998), apresentaram um sistema computacional de apoio ao planejamento da operação de sistemas hidroelétricos, denominado “SISCOM”, com interface computacional amigável com o usuário. Era usada uma combinação de programação linear e programação dinâmica, tendo como característica a tomada de decisão para o período “i+1” dependente do conhecimento da decisão do período “i”.

Lopes (2001) utilizou técnicas de programação não linear para otimização da operação de sistemas hidroenergéticos. Neste mesmo trabalho foi avaliado o desempenho de diferentes funções objetivos e regras de deplecionamento para otimização de sistemas hidroenergéticos. Como estudo de caso foi escolhido o Sistema Paranapanema.

Brandão (2004) cita a crescente expansão do parque gerador hidroelétrico brasileiro a partir da década de 50, com o início da construção das grandes barragens. Ao longo das décadas de 70 e 80, o número expressivo de usinas hidrelétricas exigiu o desenvolvimento de ferramentas e técnicas de modelagem de operação de reservatórios, geração de séries sintéticas de vazões, de previsões de afluências, etc.

Brandão (2004) também se utiliza da programação não-linear (PNL), elaborada com auxílio da ferramenta GAMS e solucionada com o pacote de otimização MINOS. O modelo foi desenvolvido para aplicação na otimização de sistemas de reservatórios com multiobjetivo, destacando-se a geração hidrelétrica, irrigação e navegação. Neste trabalho, Brandão apresenta duas possibilidades para a modelagem de sistemas de uso múltiplo que possua a navegação fluvial como um dos seus componentes. A primeira possibilidade é o emprego de restrições de nível (mínimo e máximo) ao longo da cascata que satisfaça os requisitos necessários para a operação deste modal. Outra possibilidade caso necessário é a consideração do volume de água retirada do

reservatório utilizado no processo de eclusagem através da função objetivo. O estudo de caso apresentado foi desenvolvido para a cascata do rio São Francisco.

Labadie (2004) comenta a respeito das muitas questões que envolvem a utilização de modelos de otimização e simulação. Estas dificuldades estão sendo vencidas pelo poder de processamento e a velocidade dos modernos computadores portáteis, que tem reduzido o grau de simplificações e aproximações que eram requeridos no passado nos modelos de otimização de sistemas de reservatórios, abrindo portas para uma modelagem de otimização de grande realismo. Labadie também cita a incorporação de sistemas inteligentes baseados no conhecimento para dentro da modelagem de sistemas de reservatórios os quais reconhecem o valor da intuição e da experiência dos operadores dos sistemas de reservatórios.

Franco (2006) desenvolve ferramenta de Suporte a Decisão com objetivo de avaliar alternativas de otimização energética em um conjunto de reservatórios de usinas hidrelétricas. O sistema foi desenvolvido para subsidiar a tomada de decisão dos agentes operadores com vistas à maximização dos benefícios de geração neste sistema. A modelagem para otimização foi fundamentada na utilização de programação não-linear. Para as funções multi-objetivos referentes à reservação ou produção de energia elétrica, foram tratados pelo método das ponderações. O sistema foi desenvolvido para aplicação no parque gerador da AES Tietê S.A.

Soares (2006) apresenta em seu trabalho a formulação e aplicação de um algoritmo de otimização de médio prazo, aplicado as usinas hidrelétricas da AES Tietê para satisfazer as metas de geração impostas pelo planejamento centralizado do SIN (ONS) e diversas restrições, como navegação, por exemplo. O modelo busca uma programação “ótima” de manutenção das unidades geradoras das usinas envolvidas.

Lee et al. (2009) apresenta exemplo da aplicação de modelos integrados de otimização-simulação na reavaliação de metodologia utilizada para controles de cheias e enchimento dos reservatórios em resposta aos efeitos do aquecimento sistemático e mudanças climáticas. O trabalho foi desenvolvido para a bacia do rio Columbia. O modelo de otimização fundamenta-se na ferramenta (HEC-PRM) associado ao modelo de simulação (ColSim).

4. Estudo de Caso.

4.1.A Hidrovia Tietê-Paraná – Cascata do Rio Tietê.

A escolha da Hidrovia Tietê-Paraná para estudo de caso deve-se a situação diferenciada do Brasil na utilização de empreendimentos de uso múltiplo para navegação e geração de energia hidroelétrica. Em especial o trecho da hidrovia localizada no rio Tietê, com suas 08 eclusas e 06 (seis) usinas hidrelétricas. Cinco empreendimentos são operados pela concessionária AES Tietê SA e um operado pela Companhia Energética de São Paulo (CESP).

A administração hidroviária é de responsabilidade do Departamento Hidroviário do Estado de São Paulo (DH), ligada a Secretaria Estadual de Transportes (STSP). Pelo trecho Tietê, da hidrovia Tietê-Paraná, flui em média 85% de toda carga transportada pela Hidrovia Tietê-Paraná. O estudo proposto por este trabalho se restringiu ao estudo do comportamento da cascata de usinas e eclusas operadas pela AES Tietê S.A, ou seja, as usinas e eclusas de Barra Bonita, Bariri, Ibatinga, Promissão e Nova Avanhandava.

A Hidrovia Tietê-Paraná (figura 4.1) possui 2.400 km de extensão, sendo 800 km de vias navegáveis no rio Tietê e 1.600 km no rio Paraná. A malha hidroviária alcança os estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná, integrando-se na região do Mercosul.

A concepção da hidrovia surgiu na década de 40 e foi implantada conjuntamente com o programa energético do estado de São Paulo, através do início da construção das usinas hidroelétricas da cascata do rio Tietê na década de 50.

A macro região influenciada pela hidrovia Tietê-Paraná possui 76 milhões de hectares quadrados, representando 50% do PIB Nacional, segundo o Balanço Anual dos Transportes/2008 do Estado de São Paulo.

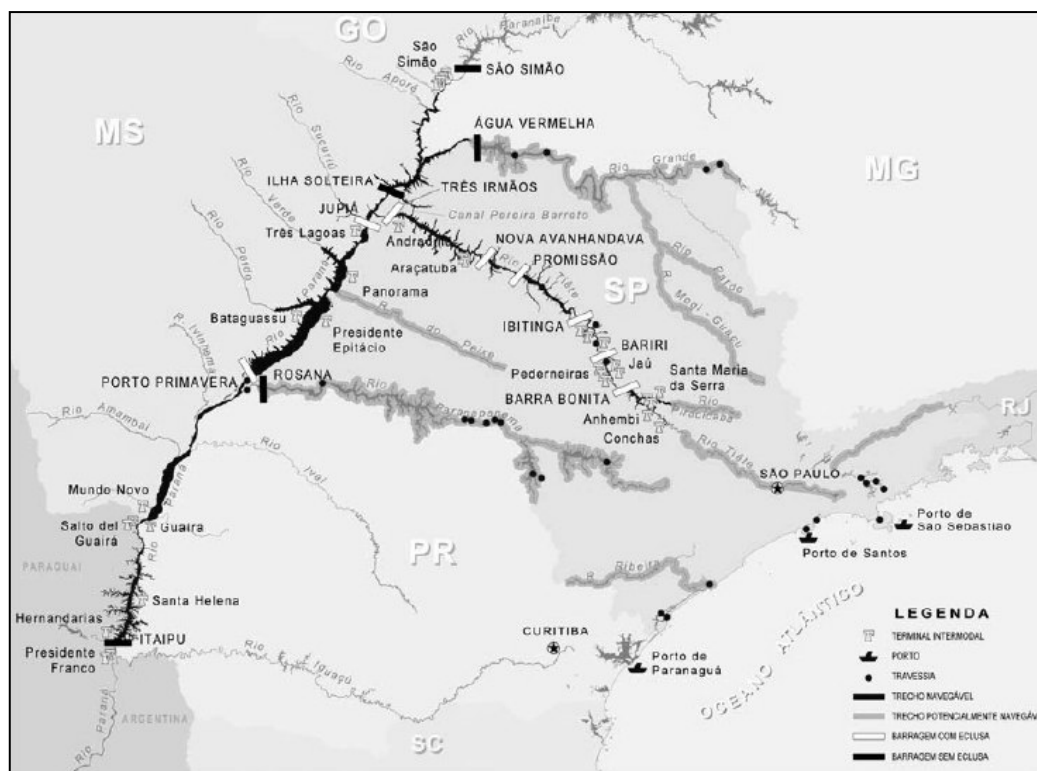


FIGURA 4.1 - Mapa Hidrovia Tietê-Paraná, (STSP, 2008).

A Hidrovia Tietê-Paraná possui como infra-estrutura hidroviária, 30 terminais, sendo 04 com conexão intermodal (hidro-férro-rodoviária) e 03 associados a unidades processadoras de matéria-prima. A frota em operação atualmente é composta por 40 empurradores, 149 chatas. A capacidade de tráfego da frota é de aproximadamente 132 mil toneladas de capacidade de carga. As características técnicas da frota operante na hidrovia estão descritas na tabela 4.1.

A Transpetro, empresa subsidiária de logística de transporte da Petrobrás, iniciou em 2011 seu projeto para transporte de combustíveis pela hidrovia Tietê-Paraná.

O projeto prevê a fabricação de 20 comboios novos, compostos por 20 empurradores e 80 barcas. As primeiras embarcações devem iniciar suas operações no último trimestre de 2011. A frota terá capacidade para transportar 4 bilhões de litros de etanol por ano. Com a operação da frota da Transpetro, será injetada na hidrovía Tietê-Paraná um acréscimo de até 3,15 milhões de toneladas de carga ano. A frota da Transpetro agregará mais 152 mil toneladas de capacidade de carga para hidrovía Tietê-Paraná.

TABELA 4.1 - Frota de embarcações atuante na hidrovía Tietê-Paraná.

Empresa/Grupo	Empurradores		Barcas/Chatas	
	No.	Potência (HP)	No.	Tonelagem ton/Barca
Quintela/Quintela	4	920	16	1.500
EPN/Torque	11	700/920	44	1.500
CNA/Libra (*)	5	860	10	1.500
SARTCO/ADM	14	230/1.104	55	274/750
Diamante/COSAN (*)	5	210/500	22	350/460
Mineração Maracajá	1	-	2	-
Transpetro (* *)	20	-	80	1.900

Fonte: * (ARHAMA, 2009) Boletim Estatístico ST do Estado de São Paulo 2005.

** (Portal – Transpetro) – Início da Operação em Out/2011.

A concepção de projeto da hidrovía Tietê-Paraná previu a utilização de embarcações do tipo “empurra”, ou seja, conjunto de chatas movimentadas por “empurradores”.

A determinação da composição de projeto para cada trecho da via (Paraná e Tietê) levou em consideração as peculiaridades técnicas de cada via. Para a hidrovía Tietê o conjunto “tipo” é formado por duas chatas, totalizando 11,00 m de largura e 137,00 m de comprimento, para um calado de 2,50 m. A Hidrovía Paraná o conjunto é formado por 2 x 3 chatas, com largura total de 32 m e 210,00 m de comprimento, para um calado de 3,5m. As figuras 4.2 e 4.3 apresentam o detalhe da configuração de projeto para os comboios tipo Paraná e Tietê. Esta formação permitia a navegação dos comboios sem restrições pelas vias.

Atualmente, após varias obras de melhoria da via, são permitidas a navegação em comboios duplos (2 x 2 chatas) pelo rio Tietê. Esta configuração exige o desmembramento em comboios simples quando da passagem por infra-estruturas, e demais restrições na via, como eclusas, vãos de ponte, etc.

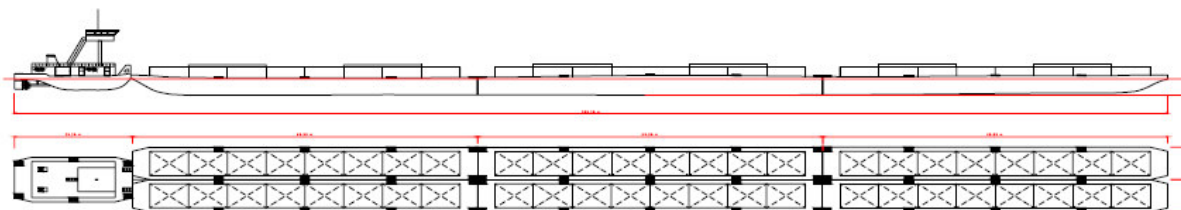


FIGURA 4.2 - Configuração de Comboio Tipo Paraná - 3 x 2 Chatas (AHRAMA, 2009).



FIGURA 4.3 - Configuração de Comboio Tipo Tietê - 2 x 1 Chata (AHRAMA, 2009).

A administração da Hidrovia Tietê-Paraná é exercida pela AHRANA (Administração da Hidrovia do Paraná, vinculada ao Ministério dos Transportes), para o trecho localizado no rio Paraná. Para o trecho da via localizada ao longo do rio Tietê, é realizado pelo DH (Departamento Hidroviário da Secretaria dos Transportes do Estado de São Paulo). A figura 4.4 apresenta as áreas de jurisdição de cada órgão além das principais restrições de navegabilidade.

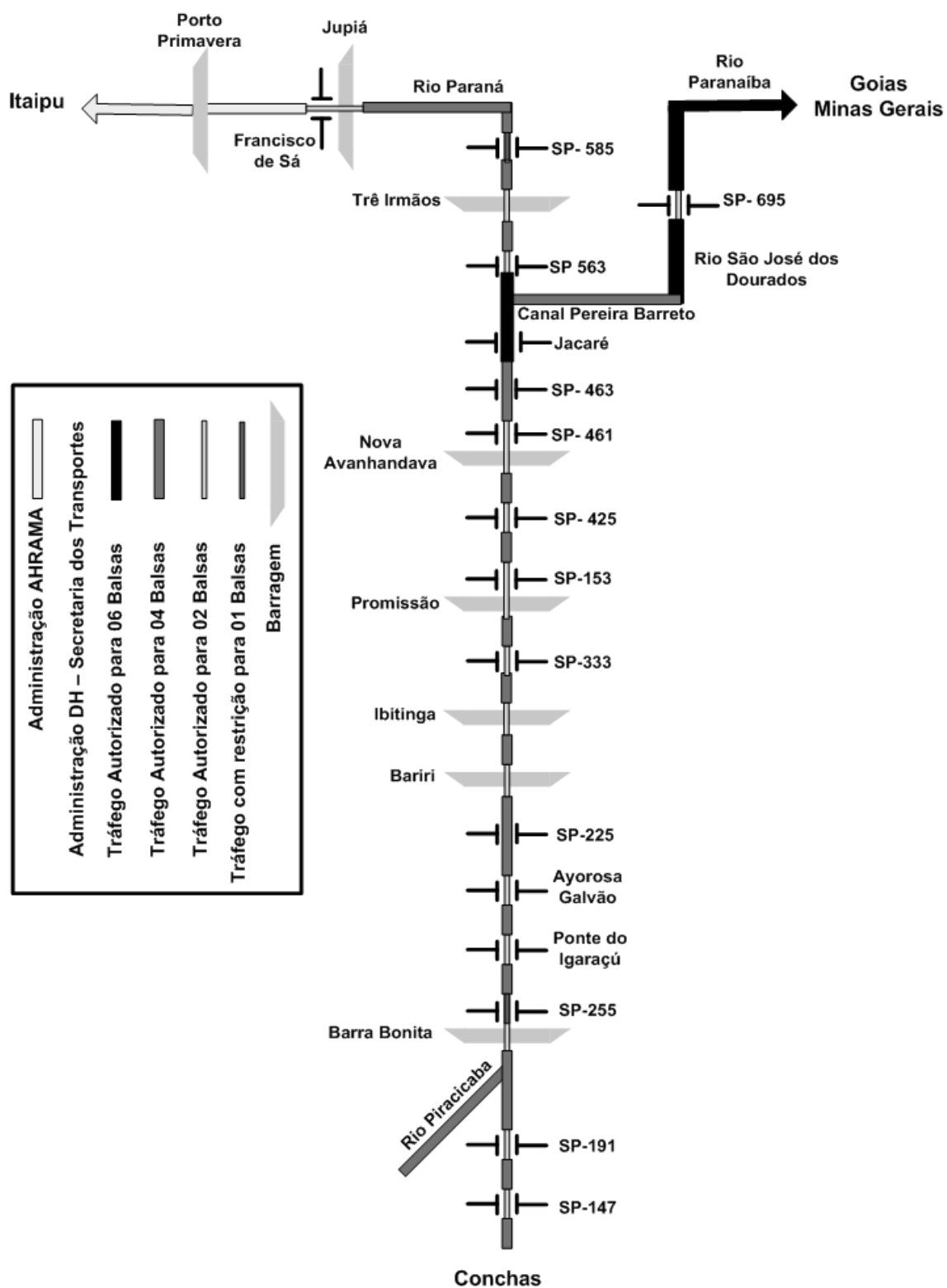


FIGURA 4.4 - Restrições de Navegabilidade – Hidrovia Tietê-Paraná (STSP, 2005)

4.2. Eclusas, usinas e Canais.

A hidrovia Tietê-Paraná possui em seus 2.400 km de extensão um total de 10 eclusas, sendo 08 localizadas no rio Tietê, garantindo 100% de sua navegabilidade. As eclusas de Nova Avanhandava e Três Irmãos possuem duas eclusas seqüenciais (escada de eclusas). No rio Paraná, apenas as UHEs de Jupia e Porto Primavera foram dotadas de sistemas de transposição de desnível. Desta forma, os limites de fronteira para navegação na hidrovia Tietê-Paraná são respectivamente as UHEs de Itaipu (Rio Paraná), Água Vermelha (Rio Grande), São Simão (Rio Paranaíba) e Rosana (Rio Paranapanema).

A tabela 4.2 apresenta o resumo técnico das eclusas da hidrovia Tietê-Paraná. Na seqüência são apresentadas imagens aéreas de cada estrutura de transposição e do canal de navegação de Pereira Barreto. O canal possui 9.600 m de extensão, e foi construído para possibilitar a transposição da UHE Ilha Solteira, estendendo o trecho navegável até a jusante das UHEs de Água Vermelha (Grande) e São Simão (Paranaíba). Na seqüência são apresentadas através das figuras 4.5 a 4.13 as estruturas de transposição de desnível (eclusas) e o canal de Pereira Barreto.

TABELA 4.2 - Características Técnicas das Eclusas Hidrovia Tietê-Paraná (DH, 2004).

Eclusas	Operadora	Número de Câmaras	Comp. útil (m)	Larg. útil (m)	Desnível máximo (m)	Inauguração da Eclusa
Barra Bonita	AES Tietê	1	142	12	25	1973
Bariri	AES Tietê	1	142	12	24	1968
Ibitinga	AES Tietê	1	142	12	23	1986
Promissão	AES Tietê	1	142	12	27	1986
Nova Avanhandava	AES Tietê	2	142	12	32,6	1991
Três Irmãos	CESP	2	142	12	49	1994
Jupia	CESP	1	210	17	23	1998
Porto Primavera	CESP	1	210	17	23	1999



FIGURA 4.5 - Eclusa de Barra Bonita – Rio Tietê (DH, 2003)



FIGURA 4.6 - Eclusa de Bariri – Rio Tietê (DH, 2003)



FIGURA 4.7 - Eclusa de Ibitinga – Rio Tietê (DH, 2003)



FIGURA 4.8 - Eclusa de Promissão – Rio Tietê (DH, 2003)



FIGURA 4.9 - Eclusa de Nova Avanhandava – Rio Tietê (DH, 2003)



FIGURA 4.10 - Eclusa de Três Irmãos – Rio Tietê (DH, 2003)



FIGURA 4.11 - Eclusa de Jupia – Rio Paraná (DH, 2003)



FIGURA 4.12 - Eclusa de Porto Primavera – Rio Paraná (DH, 2003)



FIGURA 4.13 - Canal de Pereira Barreto (DH, 2003)

4.2.1. Capacidade de Tráfego das Eclusas.

A capacidade máxima de tráfego de uma hidrovia, conforme apresentado no item 2.6.2, pode ser definida como a movimentação máxima de carga possível de ser transportada em um determinado período (normalmente anual).

A capacidade efetiva de carga, esta associado a fatores reais e econômicos de utilização. O coeficiente de utilização previsto para a Hidrovia Tietê-Paraná é de 0,39. Este valor foi arbitrado a partir de estudos estatísticos do comportamento de hidrovias de porte médio dos Estados Unidos, com características similares a Hidrovia Tietê-Paraná, devido à inexistência de dados estatísticos.

O dimensionamento da Capacidade Máxima de Tráfego para cada eclusa foi calculada considerando-se os tempos médios de projeto para cada etapa do processo de eclusagem (acesso as câmaras, enchimento, esgotamento e saída da câmara de eclusagem). A Capacidade Efetiva de Tráfego foi obtida através da aplicação do coeficiente médio de utilização sobre a capacidade máxima de carga. Os resultados teóricos de projeto para a Capacidade Máxima de Tráfego e Efetiva de Tráfego para as eclusas da Hidrovia Tietê-Paraná estão sintetizados na tabela 4.3.

TABELA 4.3 - Capacidade Máxima e Efetiva de Transporte para as Eclusas do rio Tietê (CESP, 1985).

Eclusas	Duração do Ciclo Completo de Eclusagem (min)	Capacidade Máxima de Tráfego (ton/ano)	Capacidade Efetiva de Tráfego (ton/ano)
Barra Bonita	61	41.600.000	16.200.000
Bariri	57,6	44.000.000	17.200.000
Ibitinga	64,8	40.600.000	15.900.000
Promissão	67	37.800.000	14.800.000
Nova Avanhandava	49	51.800.000	20.200.000
Três Irmãos	52	48.800.000	19.000.000

4.2.2. Movimentação de Carga.

A Hidrovia Tietê-Paraná registrou crescimento significativo no transporte de cargas nas últimas duas décadas. O perfil da carga transportada se manteve, observando-se uma predominância para as commodities agrícolas em especial a soja e farelo de soja. O transporte de areia também é significativo, porém atende a demandas locais, com trajetos curtos. O transporte de areia está concentrado no trecho a montante e jusante da eclusa de Barra Bonita. Para esta instalação o transporte de areia representa 41,34% do total de operações. O transporte de cana de açúcar

também assume características locais, com intensa participação no trecho localizado a montante e jusante da eclusa de Bariri. Este transporte representa 27,35% de toda operação desta instalação. O transporte de longa distância é liderado pelo transporte de soja e farelo de soja.

Em 1995 foi registrado o transporte de 1,087 milhões de toneladas de carga, o que representou a movimentação de 320 milhões de TkU, com percurso médio de 294 km. Em 2008 foi apurada a movimentação de 4,973 milhões de toneladas de carga, com um total de 1,355 bilhões de TkU, com percurso médio de transporte de 272 km.

Foi verificado um aumento de 457% no transporte de cargas durante o período de 1995 a 2008 (13 anos), porém, com uma pequena redução da distância média de transporte.

Outro fato importante a ser destacado é que neste período não ocorreu aumento significativo da capacidade de transporte da frota de embarcações que operam na hidrovia. A capacidade da frota vem se mantendo na faixa de 132.000 toneladas.

O crescimento do volume transportado pode ser explicado através das medidas operacionais implementadas pelo órgão regulador (Departamento Hidroviário). Entre as principais medidas, destaca-se:

- a) Aumento do calado máximo permitido, dos 2,50m de projeto, para os atuais 2,90m.
- b) Aumento do número de chatas permitidas por comboio, das 02 (duas) de projeto para 06 (seis).

Estas medidas possibilitaram um grande salto de eficiência e crescimento no transporte de carga. A tabela 4.4 resume as principais medidas operacionais implementadas pelo Departamento Hidroviário e o reflexo em termos de crescimento do volume de carga transportada. Os gráficos (figuras 4.14 e 4.17) demonstram o crescimento do volume de carga transportada, TkU e a sua estratificação por produto.

TABELA 4.4 - Melhorias Operacionais Hidrovia Tietê-Paraná (ST-SP, 2008).

Data	No. De Chatas por Comboio	Calado Máximo (m)	Capacidade de Carga (ton.)	Crescimento da Capacidade
1991	2	2,50	2.500	Base
2000	4	2,50	5.000	100%
2003	4	2,70	5.400	116%
2005	4	2,90	5.800	132%
2006	6	2,90	8.700	248%

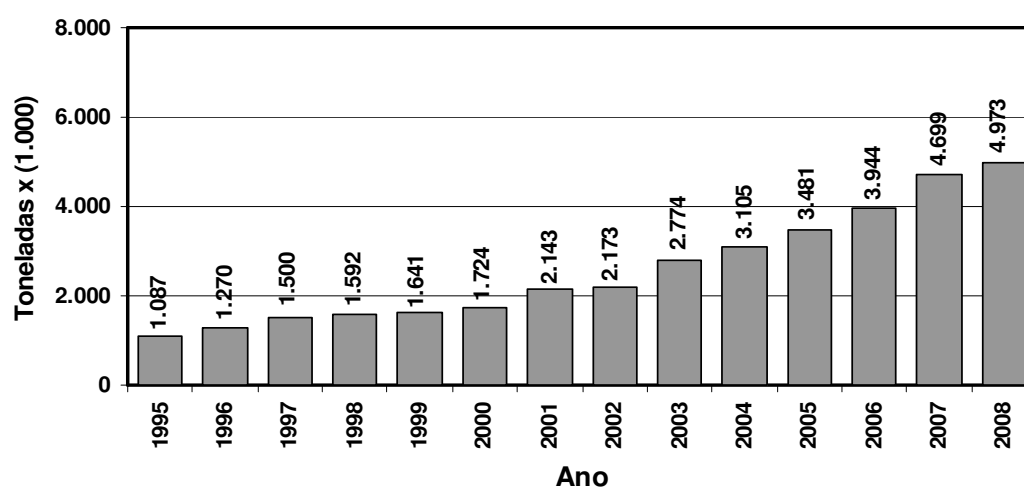


FIGURA 4.14 - Transporte anual de cargas (ton) pela hidrovia Tietê-Paraná (DH, 2008)

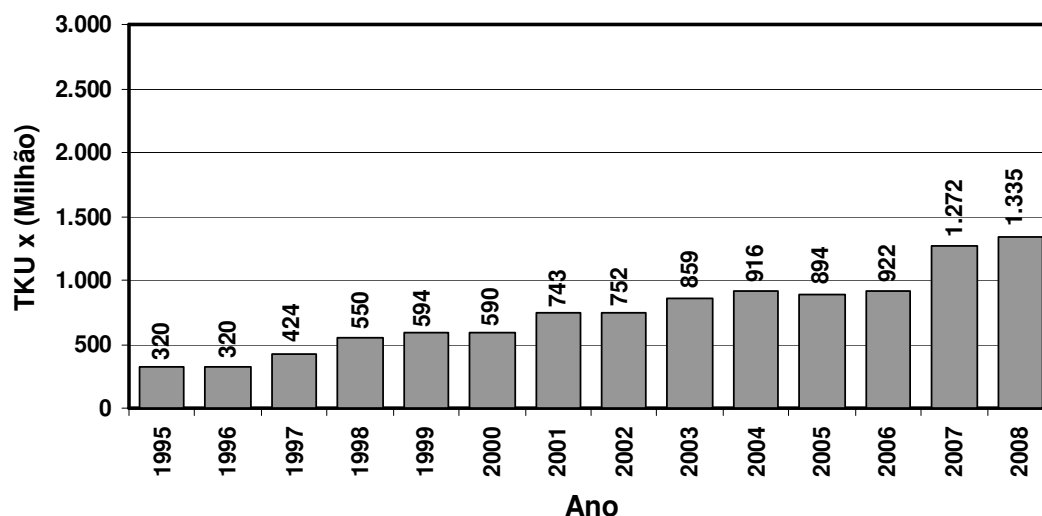


FIGURA 4.15 - Transporte anual de cargas (TkU) pela hidrovia Tietê-Paraná (DH, 2008).

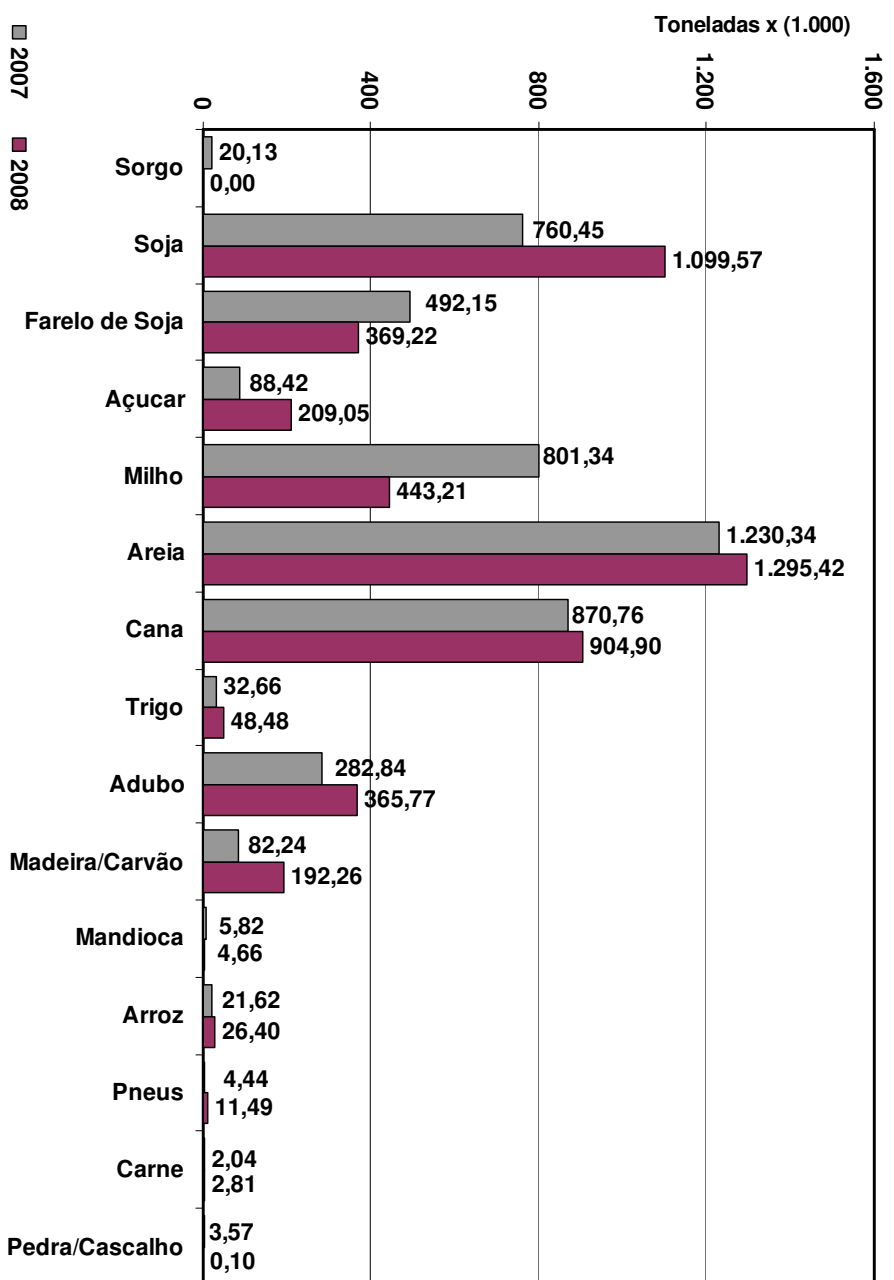


FIGURA 4.16 - Principais Commodities Transportados em toneladas (DH, 2008)

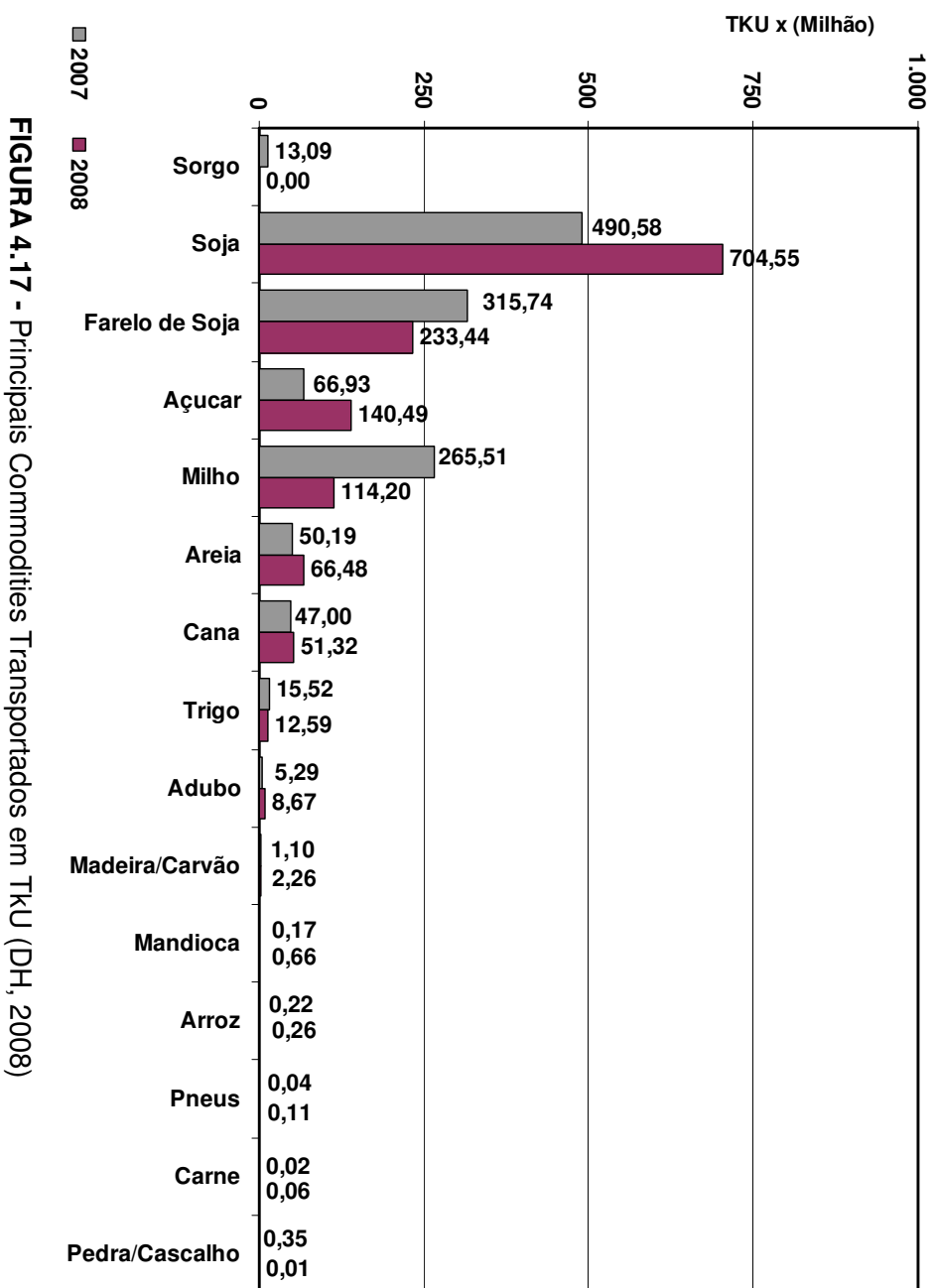


FIGURA 4.17 - Principais Commodities Transportados em TKU (DH, 2008)

4.2.3. Previsões de Crescimento.

Alguns fatores indicam cenários de potencial crescimento para o transporte hidroviário, principalmente para a hidrovía Tietê-Paraná. Além do cenário de crescimento expressivo verificado na última década, podemos citar outros fatores que sustentam a expectativa de crescimento do transporte, como:

- a) Aquecimento econômico, o interesse do governo nas esferas federal e estadual pela busca do equilíbrio entre os modais de transporte;
- b) Redução de custos de transporte;
- c) Aumento da competitividade internacional;
- d) Previsões de crescimento setoriais, como o sucroalcooleiro e petrolífero;

O setor sucroalcooleiro prevê expressivo crescimento para os próximos anos, dos atuais 22 milhões de m³ em 2008, para os 60 milhões de m³ em 2020 (STSP, 2008). Estudos estão sendo realizados entre o setor Sucroalcooleiro, Transpetro, Governos Federal e Estadual, para a implantação de uma infra-estrutura de transporte, composta por terminais intermodais em Conchas ou Anhembi. Alcooldutos para interligação destes terminais até o pólo petroquímico de Paulínia e portos. Esta infra-estrutura permitirá a canalização da produção de álcool de toda região central do estado de São Paulo, Minas, Goiás e Mato Grosso. Também se estuda a viabilidade da construção de um ramal ferroviário de interligação da malha ferroviária da ALL (América Latina Logística) até os terminais de Conchas ou Anhembi, permitindo o esgotamento da produção de açúcar. O gráfico da figura 4.18 apresenta a estimativa de crescimento da hidrovía até 2020 (Fonte DH).

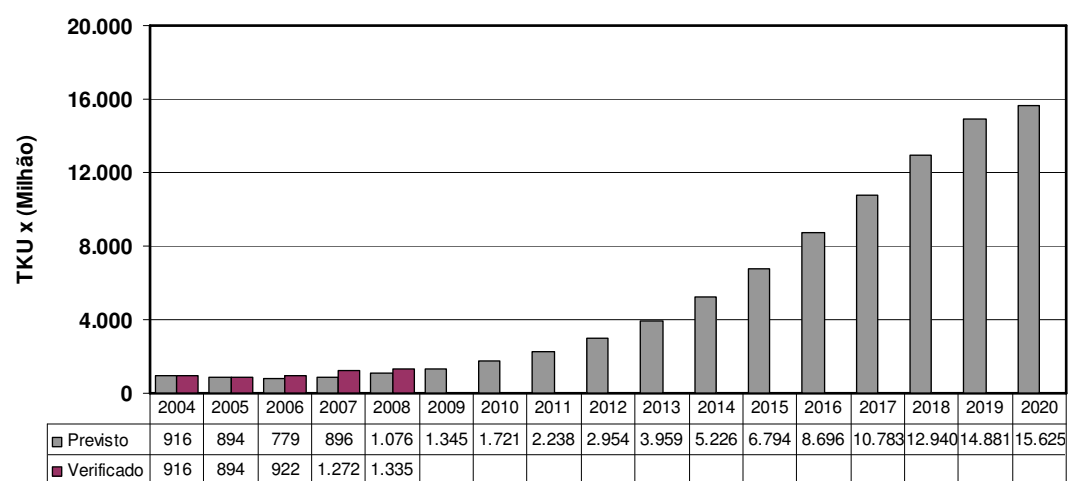


FIGURA 4.18 - Expectativa de Crescimento versus Realizado na Hidrovia Tietê-Paraná (DH, 2008)

5. Método.

5.1. Programa de Otimização e Simulação.

Atualmente o mercado oferece diversos programas e aplicativos comerciais que podem ser utilizados para aplicação em soluções de problemas que envolvam otimizações e simulações. Parcelas significativas destes aplicativos tiveram sua origem no meio acadêmico. Para solução do problema proposto neste trabalho optou-se pela utilização do modelo desenvolvido por Lopes (2001), como ferramenta alternativa para solução de problemas de otimização de menor porte.

O modelo foi desenvolvido no aplicativo Microsoft Excel, utilizando a ferramenta de otimização “Solver”. A ferramenta de otimização Microsoft Excel Solver utiliza código de otimização não linear - Generalized Reduced Gradient (GRG2), desenvolvido por Leon Lasdon, da University of Texas em Austin e Allan Waren da Cleveland State University.

Segundo Lopes (2001), para problemas lineares e de inteiros, a ferramenta Solver utiliza o método Simplex com limites sobre as variáveis e o método de desvio e limite, implementado por John Watson e Dan Fylstra, da Frontline Systems, Inc.

A opção pela utilização da ferramenta Excel tem como benefício à boa interface gráfica para avaliação de resultados, possibilidade de utilização da planilha como módulo de simulação, de fácil interação com o usuário, onde o mesmo pode alterar manualmente os resultados oriundos do modelo otimizador e assim testar novas hipóteses.

Outra vantagem estratégica do modelo é a sua flexibilidade para adequação a novos sistemas e necessidades. Outro aspecto é a facilidade para disseminação do conhecimento no meio profissional e acadêmico, por se tratar de uma ferramenta de baixo custo e amplamente difundida no meio comercial. Para problemas de maior porte, a opção é a aquisição de pacotes comerciais que potencializam o aplicativo Solver do Microsoft Excel. Uma destas opções é o pacote oferecido pela Frontline Systems.

As figuras 5.1 a 5.3 na seqüência apresentam algumas interfaces do modelo desenvolvido por Lopes (2001), adaptado para a cascata do rio Tietê, com inclusão da utilização hidroviária.

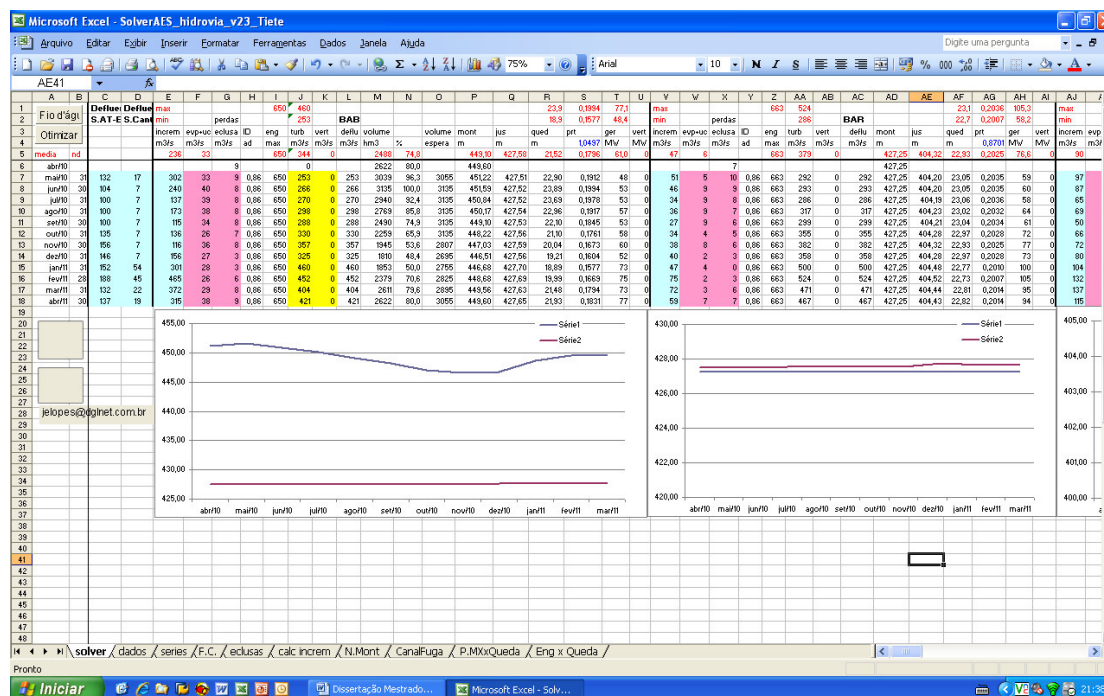


FIGURA 5.1 - Tela de Interface do SolverAES_Hidrovia – Módulo Solver.

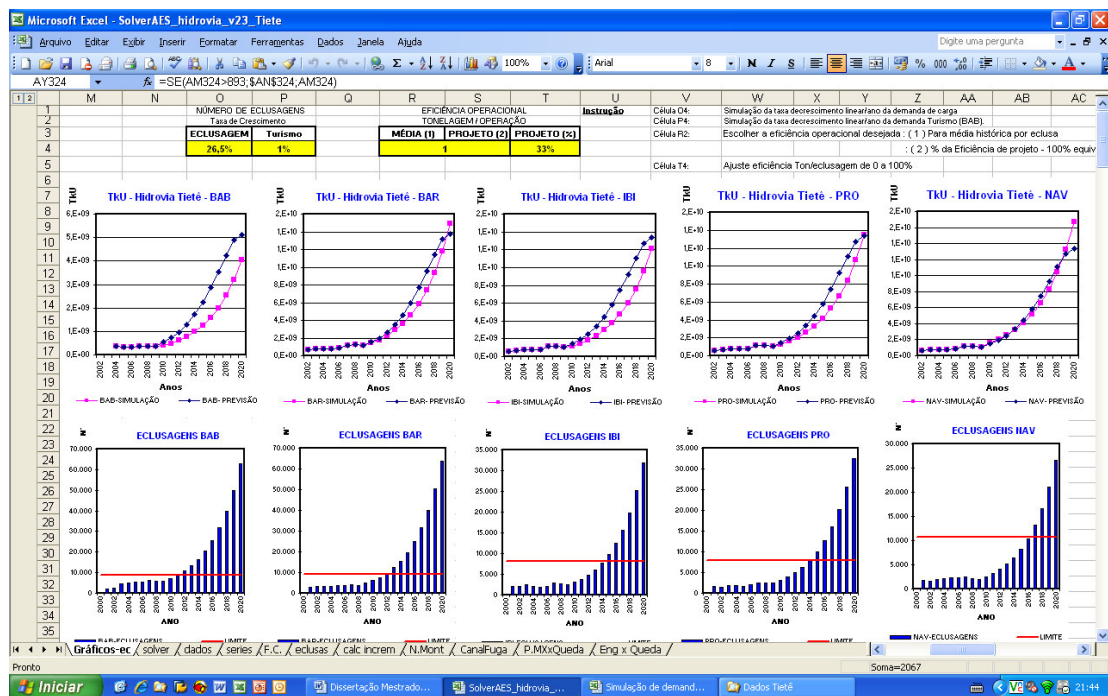


FIGURA 5.2 - Tela de Interface do SolverAES_Hidrovia – Módulo Hidrovia.

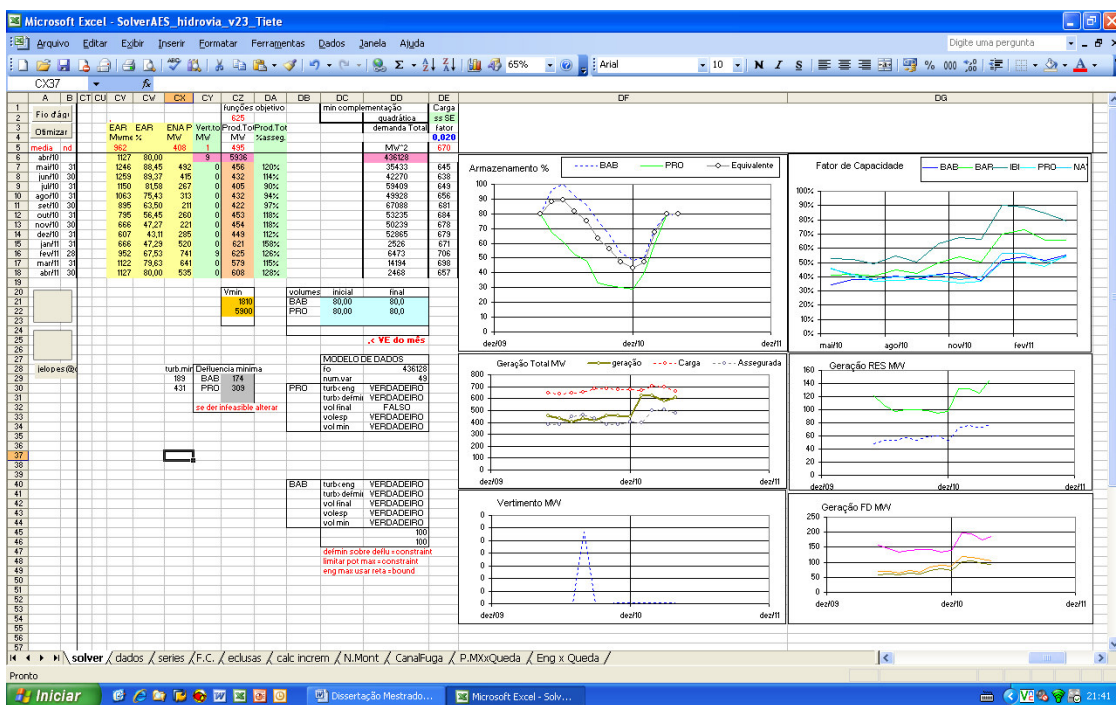


FIGURA 5.3 - Tela de Interface do SolverAES_Hidrovia – Módulo Solver Resultados.

5.2.Topologia do sistema.

O aproveitamento da bacia do rio Tietê pode ser subdividido em três subsistemas: Alto, Médio e Baixo Tietê, conforme representação física - figura 5.4. A região do médio e baixo Tietê teve seu aproveitamento direcionado para geração e navegação, composta por 06 usinas hidroelétricas, dotadas de sistemas de transposição de desnível.

O subsistema do alto Tietê, bem mais complexo que o médio e baixo Tietê, é composto por um conjunto de reservatórios, usinas e estações de bombeamento com objetivo de atender as três utilidades principais: abastecimento humano, controle de cheias e geração hidroelétrica para região da grande São Paulo.

Segundo o ONS (2009) “este sistema é um dos mais claros exemplos de conflitos advindos da utilização múltipla dos recursos hídricos em bacias urbanas”.

Durante a ocorrência de elevadas vazões nos rios Tietê e Pinheiros na região urbana da cidade de São Paulo, as usinas elevatórias de Traição, Pedreira e Bom Retiro, realizam a operação chamada de reversão, ou seja, o bombeamento das águas do rio Pinheiros para a represa Billings. Esta operação caracteriza-se como uma transposição de bacias. A água retirada do rio Pinheiros é utilizada para geração na usina de Henry Borden.

Segundo o ONS (2009), essa situação só ocorre quando é caracterizada a operação para controle de cheias, de acordo com a Resolução Conjunta SMA/SES-03/92, ou seja, quando a previsão de vazão no rio Tietê, na confluência com o Canal Pinheiros, for superior a $160 \text{ m}^3/\text{s}$ ou ocorrer nesse local, uma sobrelevação de 30 cm, em relação ao nível verificado antes da ocorrência das chuvas.

Atualmente, devido ao alto índice de poluentes existentes nas águas do rio Tietê, o sistema, em condições normais é operado de forma a drenar toda vazão afluente do canal Pinheiros pelo sangradouro de Traição e pela estrutura de Retiro. As vazões do rio Pinheiros somam-se as vazões afluentes do rio Tietê, sendo conduzida a

jusante (Médio Tietê), através das comportas do vertedouro da Barragem Edgard de Souza.

O sistema Cantareira é formado por um conjunto de reservatórios, operados pela Sabesp. O objetivo principal deste sistema, formado pelos reservatórios de Jaguari, Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro é o abastecimento de água para a grande São Paulo. O sistema do alto Tietê foi considerada de forma simplificada na modelagem do problema de otimização-simulação, devida a sua capacidade de regularização da afluência da usina de Barra Bonita. Foi considerada na modelagem a contribuição da vazão afluenta proveniente do sistema Cantareira.

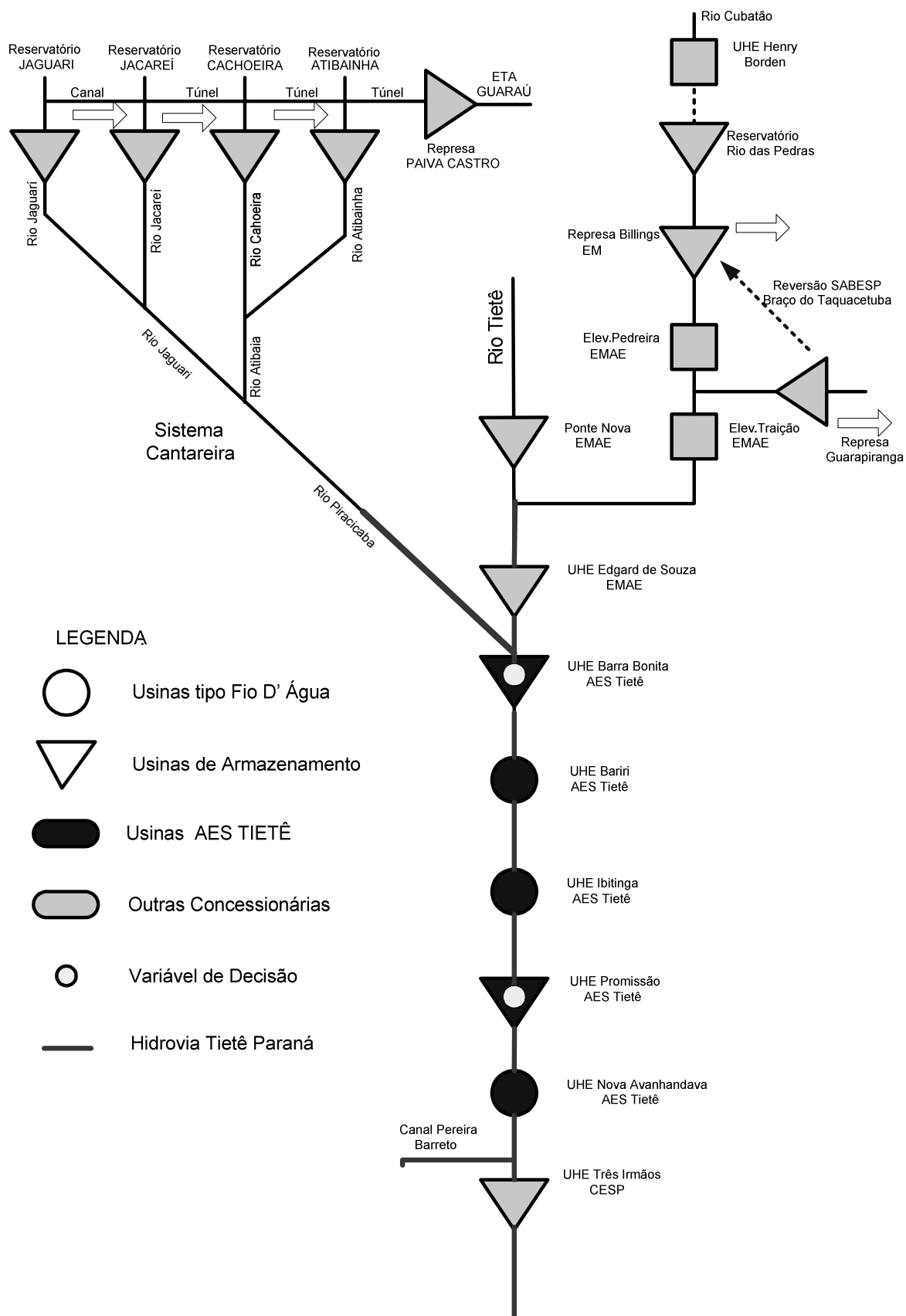


FIGURA 5.4 - Topologia da Cascata do Rio Tietê.

5.3.Representação Matemática.

A representação matemática de um sistema hidroenergético é constituída por nós e arcos como uma rede (Lopes, 2001). Esta disposição tem como objetivo representar o acoplamento espacial entre reservatórios de um sistema hidroenergético e suas variáveis em ambiente temporal.

Nesta representação os reservatórios de acumulação recebem a mesma simbologia (Triângulo), utilizada para representação do sistema físico. Os reservatórios do tipo fio d' água são representados por círculos.

As variáveis são representadas por arcos verticais e setas. Os arcos verticais simbolizam variáveis de decisão como: vazões vertidas (QV), turbinadas (QT) ou Eclusadas (QEc). As setas horizontais representam variáveis de armazenamento em usinas reservatório. Esta variável é função direta da decisão adotada para determinação das vazões defluentes ($QT + QV + QEc$) menores que as vazões afluentes (QAf), representada por seta inclinada com sentido de “input” ou “entrada” no reservatório. Variáveis de retirada, como vazões provenientes de evaporação (QEv) e de uso consuntivo (QCo), possuem a mesma representação quanto à direção inclinada, porém, possuem sentido de “saída” do reservatório.

A representação simboliza o sistema e suas variáveis em um determinado instante de tempo (t_0). A dinâmica temporal é simbolizada por um novo diagrama em instante de tempo (t_1) e assim sucessivamente até o instante (t_n).

O intervalo de tempo (Δt) empregado para tomada de decisão (otimização-simulação) pode ser escolhido conforme necessidade, característica, modelo ou do problema que se deseja solucionar.

Para atendimento ao propósito de estudo de previsões e simulações do sistema de usinas da cascata do rio Tietê, optou-se por um modelo de discretização mensal em um horizonte anual. A figura 5.5 ilustra o modelo de representação matemático para o sistema de usinas do rio Tietê.

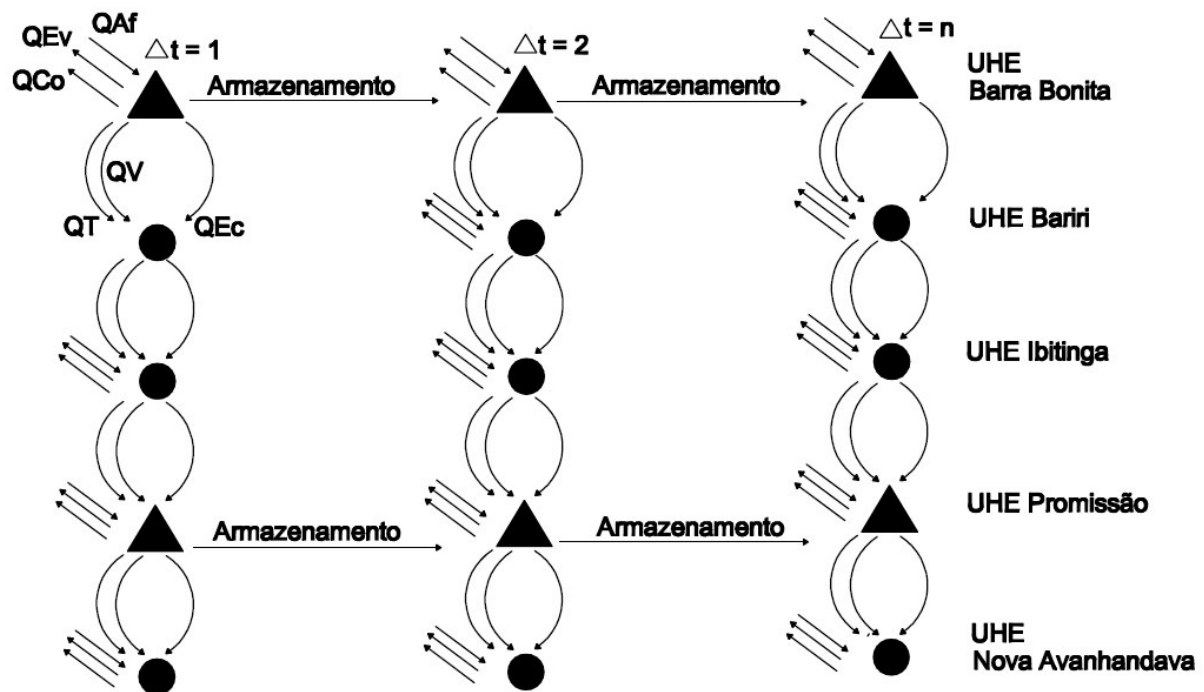


FIGURA 5.5 – Representação Matemática – Sistema de usinas do Rio Tietê.

5.4. Equacionamentos.

Este capítulo é reservado para tratamento do equacionamento matemático do modelo de otimização utilizado neste trabalho. A figura 5.6 (modificado de Lopes, 2001 e Brandão, 2004), ilustra uma representação física do sistema de uso múltiplo (geração e navegação) com as principais variáveis envolvidas. Na sequência é apresentado todo equacionamento do sistema.

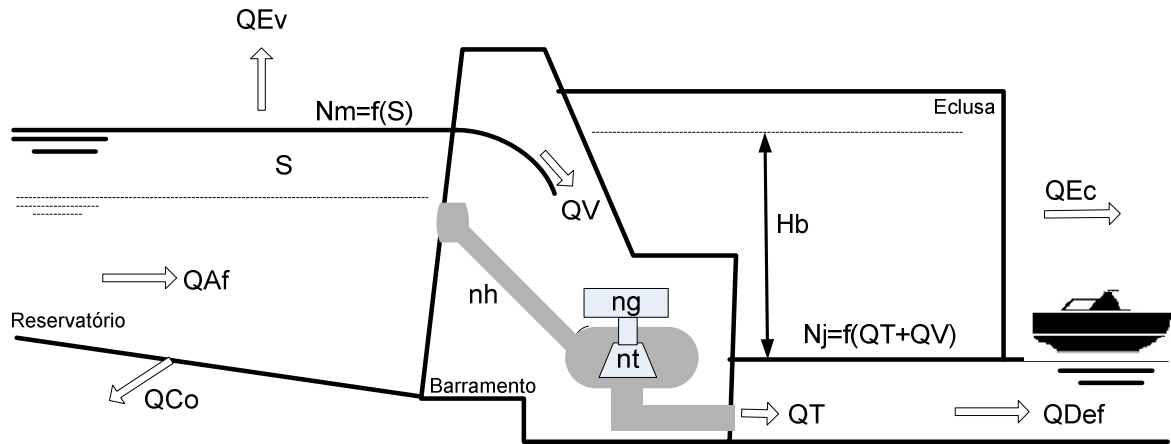


FIGURA 5.6 – Representação das variáveis envolvidas nos processos de geração e eclusagem.

Onde:

n_T - Rendimento global do conjunto turbina, gerador e circuito hidráulico (adimensional);

n_g - Rendimento do gerador (adimensional);

n_t - Rendimento da turbina (adimensional);

n_h - Rendimento do circuito hidráulico (adimensional);

Hb - Queda bruta (m), diferença entre o Nível de Montante (Nm) e Jusante (Nj);

QT - Vazão turbinada (m^3/s);

QV - Vazão vertida (m^3/s);

QEv - Vazão proveniente de evaporação do reservatório (m^3/s);

QEc - Vazão utilizada na eclusagem (m^3/s);

QCo - Vazão de uso consuntivo (m^3/s);

QAf - Vazão afluente (m^3/s);

$QDef$ - Vazão Defluente (m^3/s);

Nm - Nível de Montante (m);
 Nj - Nível de Jusante (m);
 S - Armazenamento (m³);

A análise da figura 5.6 possibilita a dedução dos equacionamentos a seguir:

a) Cálculo do coeficiente de rendimento global (n) do conjunto hidrogerador;

$$n_T = n_g \times n_t \times n_h \dots\dots\dots(9)$$

b) Cálculo da vazão defluente;

$$QDef = QT + QV + QEc \dots\dots\dots(10)$$

c) Cálculo da vazão equivalente de eclusagem (m³/s);

$$QEc = \frac{(Ar \times Hb) \times Nop}{nd \times kd} \dots\dots\dots(11)$$

Onde:

Ar - Área da Câmara da Eclusa (m²);
 nd - Número de dias no mês;
 Nop - Número de operações de eclusagens no mês;
 kd - Constante de transformação de tempo - dias em segundos (s);

d) Cálculo da energia produzida (MWmédios);

$$P = 9,81 \times 10^{-3} \times n_T \times Hb \times QT \dots\dots\dots(12)$$

Onde:

P - Produção de energia (MWmédio);

e) Cálculo da Produtibilidade (ξ), expressa em (MW/m³/s);

$$\xi = 9,81 \times 10^{-3} \times n_T \times Hb \dots\dots\dots(13)$$

Onde:

9,81 - Aceleração da Gravidade (m/s²);

10⁻³ - Peso específico da Água (kg/cm³);

Substituindo-se (13) em (12), temos a equação simplificada (14) para produção de energia.

$$P = \xi \times QT \dots\dots\dots(14)$$

5.4.1. Função Objetivo.

Brandão (2004) define função objetivo como uma forma matemática de explicitar numericamente o grau de atendimento a objetivos do sistema em análise. Neste mesmo trabalho são citados alguns tipos de funções objetivos freqüentemente utilizados na modelagem de problemas de uso múltiplo em recursos hídricos:

- a) Maximização de benefícios do sistema;
- b) Minimização dos desvios quadráticos em relação a uma curva guia de operação;
- c) Minimização dos desvios quadráticos em relação a uma curva de demanda;
- d) Minimização de Vertimento;

Lopes (2001) testou o desempenho de três tipos de funções objetivo, duas associadas à maximização (produção total do sistema e lucro sobre energia secundária). Uma terceira função objetivo foi testada, buscando a minimização da complementação de energia, utilizando a metodologia dos desvios quadráticos.

Os resultados obtidos com os testes demonstraram que as funções de maximização apresentaram melhor resposta quanto à produção máxima comparativamente com a função de minimização de desvios quadráticos. Quando avaliado o desempenho em relação à trajetória temporal, a função objetivo de minimização de complementação de energia apresentou-se superior as funções de maximização.

Para modelagem do problema de uso múltiplo em cenários de curto, médio e longo prazo para diversas situações hidrológicas associado a diversas taxas de demanda, optou-se pela função objetivo que mantivesse o melhor resultado da trajetória temporal. Neste caso a escolha foi pela função de minimização da complementação de energia.

A equação (15) foi elencada para solução do problema de uso múltiplo proposto. A proposta desta função objetivo é buscar o desempenho ótimo da produção de energia minimizando o desvio quadrático de uma curva de demanda, durante toda a trajetória temporal, evitando operações extremas influenciadas pela sazonalidade hidrológica, penalizando desta forma outras utilizações.

Como referência da curva de demanda para o problema foi utilizado um percentual aproximado da demanda prevista para a região sudeste que seria atendida pela produção das usinas do rio. Esta curva de demanda alocada para a cascata do rio Tietê, representa aproximadamente 2% da demanda da região Sudeste.

- Função Objetivo - Minimizar a complementação de energia (min Z);

$$\min Z = \sum_{t=1}^n (D - \sum_{i=1}^m (\xi_{i,t} \times QT_{i,t}))^2 \dots\dots\dots(15)$$

Onde:

$\xi_{i,t}$ - Produtibilidade durante o mês t no reservatório i (MW/(m³/s));

$QT_{i,t}$ - Vazão Turbinada durante o mês t no reservatório i (m³/s);

D - Demanda superior a capacidade do sistema (MW);

i - Índice do Reservatório;

t - Índice do Mês;

m - Índice indicativo da quantidade de reservatórios de um sistema;

n - Índice de tempo de um sistema de reservatórios;

5.4.2. Conjunto de Restrições.

Neste capítulo são apresentadas as restrições utilizadas para modelagem da situação de contorno do problema. A equação (16) representa a equação da continuidade, onde o armazenamento do reservatório (variável de estado) é função das variáveis de decisão (vazões).

A equação (17) determina os limites para a variável de armazenamento. Os limites utilizados são os volumes máximos e mínimos dos reservatórios, para condição normal de operação.

A equação (18) impõe faixa de operação para o turbinamento, respeitando os limites operacionais e de desempenho das turbinas. A equação (19) tem objetivo de impedir a opção vertimento “negativo” durante o processo iterativo de determinação da condição ótima.

A equação (20) condiciona a capacidade de geração da usina “i” a uma disponibilidade do reservatório (queda) e disponibilidade da usina (máquinas em operação). A equação (21) condiciona que a produção sempre busque atender a uma curva de demanda. A equação (22) impõe a condição de armazenamento final maior que a condição de partida.

As equações (23) e (24) impõe restrições de nível máximo e mínimo para navegação a montante e jusante. Estas restrições podem ser utilizadas ou “desconsideradas”, quando, por exemplo, coincidirem com outras restrições (nível máximo de armazenamento).

a) Equação da Continuidade;

$$S_{i,t} = S_{i,t-1} + \left(\sum_{k=1}^{ji} (QT_{k,t} + QV_{k,t} + QEc_{k,t}) + QAf_{i,t} - QT_{i,t} - QV_{i,t} - QEv_{i,t} - QCo_{i,t} - QEc_{i,t} \right) \times nd_t \times 0,0864 \quad \text{.....(16)}$$

b) Armazenamento mínimo e máximo;

$$S_i^{\min} \leq S_{i,t} \leq S_i^{\max} \quad \forall_i, \forall_t \dots\dots\dots(17)$$

c) Vazão Turbinada mínima e máxima;

$$QT_i^{\min} \leq QT_{i,t} \leq QT_i^{\max} \times ID_i \quad \forall_i, \forall_t \dots\dots\dots(18)$$

d) Vazão Vertida não negativa;

$$QV_{i,t}^n \geq 0 \quad \forall_i, \forall_t \dots\dots\dots(19)$$

e) Capacidade das Turbinas;

$$\xi_{i,t} \times QT_{i,t} \leq \bar{P}_i \times ID_i \quad \forall_i, \forall_t \dots\dots\dots(20)$$

f) Demanda de energia;

$$\sum_{i=1}^m (\xi_{i,t} \times QT_{i,t}) \geq d_t \quad \forall_t \dots\dots\dots(21)$$

g) Armazenamento final;

$$S_{i,f} \geq S_{i,0} \dots\dots\dots(22)$$

h) Nível operacional de navegação (Montante);

$$Nm_i^{\min} \leq Nm_{i,t} \leq Nm_i^{\max} \quad \forall_i, \forall_t \dots\dots\dots(23)$$

i) Nível operacional de navegação (Jusante);

$$Nj_i^{\min} \leq Nj_{i,t} \leq Nj_i^{\max} \quad \forall_i, \forall_t \dots\dots\dots(24)$$

Onde:

- $S_{i,t}$ - Armazenamento em (hm³) do reservatório da usina i , no tempo t (mês);
- $S_{i,t-1}$ - Armazenamento em (hm³) do reservatório da usina i , no tempo $(t-1)$;
- $QT_{k,t}$ - Vazão turbinada da usina a montante (m³/s) durante o mês t ;
- $QV_{k,t}$ - Vazão vertida da usina a montante (m³/s) durante o mês t ;
- $Afl_{i,t}$ - Vazão afluente durante o mês t , no reservatório i (m³/s);
- $QT_{i,t}$ - Vazão turbinada durante o mês t , no reservatório i (m³/s);
- $QEv_{i,t}$ - Vazão retirada por evaporação durante o mês t , no reservatório i (m³/s);
- $QCo_{i,t}$ - Vazão consultiva retirada durante o mês t , no reservatório i (m³/s);
- $QEc_{i,t}$ - Vazão retirada por eclusagem durante o mês t , no reservatório i (m³/s);
- nd - Número de dias mês;
- 0,0864 - Fator para conversão de unidades (m³/s em hm³);
- $S_i^{\min}$ - Armazenamento mínimo em (hm³) no reservatório da usina i ;
- $S_i^{\max}$ - Armazenamento máximo em (hm³) no reservatório da usina i ;
- $QT_i^{\min}$ - Vazão turbinada mínima em (m³/s) no reservatório da usina i ;
- $QT_{i,t}$ - Vazão turbinada em (m³/s) do reservatório da usina i , no tempo t ;

- $QT_i^{\max}$ - Vazão turbinada máxima em (m³/s) no reservatório da usina i ;
- $QV_{i,t}$ - Vazão vertida em (m³/s) do reservatório da usina i , no tempo t ;
- $\xi_{i,t}$ - Produtibilidade durante o mês t no reservatório i (MW/(m³/s));
- $\bar{P}_i$ - Capacidade das turbinas no reservatório i (MW);
- ID_i - Índice de disponibilidade das máquinas no reservatório i (adimensional);
- d_t - Demanda de energia durante o mês t (MWmédio);
- k - Índice de usina à montante da usina i ;

5.4.3. Polinômios de montante e jusante.

Polinômios são expressões algébricas compostas por um somatório de termos de graus diferentes. Uma das aplicações para os polinômios na engenharia hidráulica é a sua utilização para representação da função cota versus volume ou cota versus área de um reservatório. Para os canais de fuga, são utilizados polinômios para representação das curvas de cota x vazão. As expressões polinomiais são geralmente representadas através de polinômios de 4º. Grau. Esta característica não linear do armazenamento de reservatórios, condiciona a solução do problema de otimização para uma programação não linear (PNL). A equação (25) representa o equacionamento da produtividade média para uma periodicidade mensal. As equações (26) e (27) apresentam respectivamente as equações polinomiais para a determinação das curvas cota versus volume para montante e cota versus vazão para jusante de um reservatório.

Cálculo do armazenamento de Produtibilidade média (mensal);

$$\xi_{i,t} = 9,81 \times 10^{-3} \times n \times \left(\frac{Nm_{i,t} + Nm_{i,t-1}}{2} - Nj_{i,t} \right) \dots\dots\dots (25)$$

$$Nm_{i,t} = a_{0i} + a_{1i}S_{i,t} + a_{2i}S_{i,t}^2 + a_{3i}S_{i,t}^3 + a_{4i}S_{i,t}^4 \dots\dots\dots (26)$$

$$Nj_{i,t} = b_{0i} + b_{1i}\overline{QDef}_{i,t} + b_{2i}\overline{QDef}_{i,t}^2 + b_{3i}\overline{QDef}_{i,t}^3 + b_{4i}\overline{QDef}_{i,t}^4 \dots\dots\dots (27)$$

Onde:

- $Nm_{i,t}$ - Nível de montante (m) no reservatório da usina i , no tempo t (mês);
- $Nm_{i,t-1}$ - Nível de montante (m) no reservatório da usina i , no tempo t anterior;
- $Nj_{i,t}$ - Nível de jusante (m) da usina i , no tempo t (mês);
- a - Coeficiente polinomial (Montante);
- b - Coeficiente polinomial (Jusante);

5.4.4. Índice de disponibilidade de Geração (ID).

O índice de disponibilidade (ID) pode ser definido como o percentual de geração total disponível em uma usina para produção de energia em determinado período.

Inversamente, chama-se de índice de indisponibilidade a soma dos percentuais de geração indisponíveis de uma usina. A indisponibilidade pode ser resultado de paradas de unidades geradoras pela ocorrência de falhas, denominadas neste caso de indisponibilidade forçada. Para impedimentos resultantes de manutenções programadas, a indisponibilidade resultante é denominada de indisponibilidade programada. A equação (28) exemplifica o cálculo utilizado para apuração da disponibilidade de uma usina em dado intervalo de tempo, Lopes (2001).

$$ID_i = 1 - \left[\frac{\sum_1^n Pot.Nom.daUGn \times Horas.de.Manutenção}{\sum_1^n Pot.Nom.daUGn \times 24 \times nd} \right] \dots\dots\dots(28)$$

Para efeito deste estudo acadêmico, buscando a preservação de informações referentes à estratégia de manutenção empregada pela AES Tietê, utilizou-se de fonte de referência internacional para determinação da disponibilidade das unidades geradoras das usinas hidroelétricas do rio Tietê. Tomou-se o cuidado de utilizar referências que considerassem as características hidráulicas e de tempo de vida operacional equivalente. Foi utilizado índice de disponibilidade de 86,87%. Esta referência foi obtida através de consulta a base estatística da NERC (North American Electric Reliability Corporation – www.nerc.com). Este índice é resultado de tratamento estatístico de uma base de informações compostos por 1.042 unidades geradoras de mais de 12 países cadastrados no banco de dados da NERC.

5.4.5. Cenários hidroviários.

A hidrovia esta inserida no contexto de uso múltiplo. Entre os principais requisitos técnicos necessários para a operacionalização neste cenário de conflito, pode-se citar o consumo de água necessário para o processo de eclusagem (água retirada de um reservatório) e o estabelecimento de níveis limites (máximo e mínimo) para navegação em reservatórios e canais a jusante.

O cálculo do consumo de água utilizado para o processo de transposição de desnível foi descrita em termos de volume na equação (6) do capítulo 3.6.3. Observar que a determinação do volume da câmara de eclusagem deve ser considerada constante apenas para as eclusas de reservatório do tipo fio d'água, onde a variação de

nível anual pode ser considerada desprezível. Para usinas do tipo reservatório de acumulação, a variação da queda bruta em função da operação do reservatório deve ser considerada no cálculo. A equação (11) do capítulo 5.4. demonstra o equacionamento para determinação da “vazão equivalente de eclusagem”, para modelagem da equação da continuidade.

O estabelecimento de níveis limites para navegação tem como objetivo de preservar o calado mínimo de navegação e conseqüentemente a operação contínua e segura deste modal. A determinação de níveis limites para navegação pode representar uma restrição para o processo de geração, principalmente quando se limita o deplecionamento do volume útil de um reservatório. A hidrovía Tietê-Paraná possui níveis limites de operação estabelecidos para montante e jusante de cada estrutura de transposição (eclusas). A tabela 5.1 apresenta os limites operacionais de nível de montante e jusante para as eclusas do rio Tietê.

TABELA 5.1 - Níveis Operacionais para navegação (AHRANA, 2005).

ECLUSAS	Montante		Jusante	
	Mínimo Navegação	Máximo Navegação	Mínimo Navegação	Máximo Navegação
Barra Bonita	446,50	451,50	426,50	427,50
Bariri	426,50	427,50	403,50	404,00
Ibitinga	403,50	404,00	381,00	384,00
Promissão	381,00	384,00	357,00	359,00
Nova Avanhandava	357,00	358,00	325,00	328,00
Três Irmãos	325,00	328,00	279,00	280,00

Fonte: AHRANA

A conversão do número operações de eclusagem em uma vazão equivalente de transposição é uma operação relativamente simples. A complexidade desta conversão esta associada à determinação do número de operações que poderão ocorrer em função de determinadas taxas de crescimento de demanda hidroviária. A determinação de taxas de crescimento para qualquer modal viário é extremamente

complexa, dada a quantidade de variáveis envolvidas (econômicas, mercadológicas, sociais, estratégicas, etc). Como referência optou-se pela utilização do trabalho de previsão de crescimento desenvolvido pela Secretaria dos Transportes do Estado de São Paulo. Este trabalho foi desenvolvido e suportado por estudos sócio-econômico-ambiental. A figura 4.18 do capítulo 4.2.3 resume o resultado dos estudos através de um gráfico de previsão potencial de crescimento da demanda hidroviária anual (TkU) até 2020. Esta previsão inclui os objetivos estratégicos determinados pelo Estado de São Paulo de buscar uma melhor equalização dos modais de transporte até 2020. A meta é alcançar 6% da partição hidroviária na matriz de transporte do estado.

Como a previsão de crescimento do estudo realizado pela Secretaria de Transporte do Estado de São Paulo é apresentada em valores macro anuais em TkU, foi necessário, o desenvolvimento de um simulador de demanda para estratificação desta previsão global em TkU, para números de operações de eclusagens de forma sazonalizada por eclusa, contemplando várias taxas de crescimento de demanda intermediária.

O simulador foi desenvolvido através da análise histórica de dados técnicos e de desempenho de todas as eclusas operadas pela AES Tietê. Com histórico foi possível identificar e incorporar no simulador as características técnicas individuais, mercadológicas regionais, globais e de eficiência, como: demanda, número de operações, perfis de carga, eficiência operacional, etc.

Para aferição da curva do modelo de simulação, foi utilizado o perfil de crescimento verificado e potencialmente estimado pelo Departamento Hidroviário do estado de São Paulo. Na seqüência são apresentados através de tabelas os dados históricos utilizados para o desenvolvimento do simulador de demanda.

A tabela 5.2 apresenta o histórico do número de operações (número de eclusagens), registradas no período de 2001 a 2009 por eclusa.

TABELA 5.2 – Histórico do número de operações por eclusa;

Eclusas	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
BAB	2.179	2.586	4.733	5.121	5.557	5.310	6.096	5.790	6.066
BAR	3.039	3.197	3.214	3.507	3.566	3.734	4.062	3.891	4.801
IBI	2.165	2.135	2.411	2.096	1.861	2.024	2.819	2.610	2.396
PRO	1.675	1.380	1.788	1.810	1.691	1.997	2.454	2.544	2.443
NAV	1.824	1.665	1.890	2.140	2.331	2.369	2.466	2.123	2.003
Total	13.061	13.549	18.769	19.795	20.563	20.744	23.993	22.748	23.775

Fonte: AES Tietê S.A.

A tabela 5.3 apresenta o histórico do volume total de cargas em toneladas movimentadas por cada eclusa para o período de 2001 a 2009.

TABELA 5.3 - Volume de cargas em toneladas movimentadas pelas eclusas.

Eclusas	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
BAB	357.032	494.337	782.812	868.929	86.883	907.645	918.861	940.706	961.163
BAR	1.196.469	1.300.249	1.497.235	1.613.633	1.674.386	1.845.815	2.185.705	2.433.004	2.547.005
IBI	983.939	1.025.869	1.166.781	1.212.642	1.212.371	1.359.767	1.775.628	1.816.108	1.703.311
PRO	896.933	769.663	1.098.029	1.152.325	1.107.522	1.359.420	1.774.014	1.821.868	1.733.315
NAV	1.784.051	1.833.758	2.196.344	2.217.726	2.409.826	2.722.925	1.636.256	1.819.107	1.703.370

Fonte: AES Tietê S.A.

A tabela 5.4 apresenta a estratificação por tipo de carga transportada em 2007 e 2008 pela hidrovía Tietê-Paraná, além das informações de volume, TkU e a taxa de crescimento.

TABELA 5.4 - Principais cargas transportadas pela hidrovia Tietê-Paraná 2007-2008

TIPO DE CARGA	2007		2008		Crescimento %	
	Carga (T)	TkU	Carga (T)	TkU	Carga (T)	TkU
Sorgo	20.127	13.088.718	-	-	-	-
Soja	760.451	490.582.336	1.099.574	704.550.443	45	44
Farelo de Soja	492.150	315.737.465	369.223	233.439.958	-25	-26
Açúcar	88.417	66.932.026	209.051	140.491.327	136	110
Milho	801.342	265.505.619	443.210	114.199.157	-45	-57
Areia	1.230.337	50.192.652	1.295.418	66.478.880	5	32
Cana	870.763	47.003.734	904.898	51.319.855	4	9
Trigo	32.664	15.524.011	48.483	12.589.400	48	-19
Adubo	282.837	5.293.726	365.772	8.673.360	29	64
Madeira/Carvão	82.237	1.097.050	192.255	2.261.590	134	106
Mandioca	5.824	174.720	4.660	660.290	-20	278
Arroz	21.620	216.200	26.404	264.040	22	22
Pneus	4.442	44.420	11.494	114.940	159	159
Carne	2.043	20.430	2.810	62.400	38	205
Pedra/Cascalho	3.570	346.290	100	9.700	-97	-97
Total	4.698.824	1.271.759.397	4.973.352	1.335.115.340	6	5

Fonte: STSP, 2008.

A tabela 5.5 apresenta a participação histórica de cada tipo de carga na operação das eclusas.

TABELA 5.5 - Participação histórica das cargas nas eclusas da (fonte AES Tietê).

TIPO DE CARGA	BAB	BAR	IB	PRO	NAV
Soja	22,55%	39,35%	54,31%	54,31%	54,31%
Farelo de Soja	19,23%	23,49%	32,37%	32,37%	32,37%
Cana de Açúcar	0,00%	27,35%	0,00%	0,00%	0,00%
Milho	0,10%	3,34%	4,44%	4,44%	4,44%
Óleo Vegetal	0,00%	0,15%	0,21%	0,21%	0,21%
Açúcar	7,96%	2,42%	3,38%	3,38%	3,38%

TIPO DE CARGA	BAB	BAR	IB	PRO	NAV
Álcool	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Diversos	0,07%	0,04%	0,06%	0,06%	0,06%
Trigo	0,44%	0,22%	0,29%	0,29%	0,29%
Areia	41,34%	0,01%	0,02%	0,02%	0,02%
Sorgo	0,06%	0,40%	0,54%	0,54%	0,54%
Pedra	0,04%	0,06%	0,08%	0,08%	0,08%
Adubo	0,00%	0,03%	0,04%	0,04%	0,04%
Madeira	8,21%	3,14%	4,27%	4,27%	4,27%
Total de Cargas %	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Fonte: AES Tietê S.A.

A tabela 5.6 apresenta as distâncias médias de transportes (DMT) para cada tipo de carga transportada. Estas distâncias estão relacionadas com a infraestrutura aquaviária disponível (portos, atracadouros, silos de armazenagem, transbordo, etc). As principais infraestruturas estão mapeadas na figura 5.7.

TABELA 5.6 - Distância Média de Transporte (DTM);

Tipo de Carga	DMT (Km)
Soja	642
Farelo de Soja	665
Cana de Açúcar	55
Milho	699
Óleo Vegetal	804
Açúcar	649
Trigo	880
Areia	71
Sorgo	639
Pedra	73
Adubo	224
Madeira	415

Fonte: STSP, 2008.



FIGURA 5.7 – Mapeamento da infraestrutura física (portos) – Hidrovia Tietê-Paraná.

A tabela 5.7 trás a informação histórica da “eficiência” operacional das eclusas, que é o resultado direto da relação entre a quantidade de carga transportada (toneladas) por instalação em relação ao número de operações ano de eclusagem. Esta medida de eficiência consolida todas as variáveis de eficiência envolvidas na via como: sentido de transporte de carga, tipo de carga transportada, tipo e capacidade das embarcações em operação, indisponibilidade da eclusa, etc. Os resultados mostram, por exemplo, a influência do transporte de cana de açúcar (transporte regional), sob a eclusa de Bariri, grandes volumes, baixa tonelagem, resultam em baixa eficiência na relação carga/operação. Esta mesma situação é observada na eclusa de Barra Bonita, neste caso esta associada à exploração turística e mineral (areia). Neste caso específico de exploração mineral são utilizadas embarcações de pequena capacidade de carga. As demais instalações por possuírem predominância na operação de cargas de maior densidade (granel – soja e farelo de soja) apresentam melhores resultados. Outro

grande fator de penalização da eficiência é a característica de transporte unidirecional da via, o que resulta em eclusagens com embarcação a vazio.

TABELA 5.7 - Eficiência operacional média por operação (toneladas/operação);

ECLUSAS	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
BAB	166	164	191	165	170	165	171	151	162	158
BAR	391	394	407	466	460	470	494	538	625	531
IBI	402	454	481	484	579	651	672	630	696	711
PRO	307	535	558	614	637	655	681	723	716	710
NAV	538	496	557	581	521	527	626	664	857	850

A tabela 5.8 apresenta a distribuição mensal histórica do volume de carga observada por instalação. Esta informação é dada em percentual onde é possível observar a correlação com os períodos de safra, principal usuário atualmente da hidrovia.

TABELA 5.8 - Participação mensal do volume de cargas nas eclusas;

Meses	BAB	BAR	IBI	PRO	NAV
Janeiro	4,07%	0,56%	0,83%	0,81%	1,06%
Fevereiro	6,99%	3,57%	6,33%	6,80%	6,32%
Março	9,07%	7,24%	12,80%	13,81%	13,21%
Abril	9,13%	8,44%	11,74%	11,95%	13,24%
Mai	9,12%	12,67%	9,96%	10,77%	12,83%
Junho	8,76%	12,08%	9,39%	9,37%	10,24%
Julho	8,97%	11,83%	10,41%	10,07%	9,25%
Agosto	9,03%	12,15%	9,38%	10,22%	8,56%
Setembro	8,63%	10,59%	7,60%	8,55%	7,31%
Outubro	9,08%	9,93%	8,84%	7,51%	7,52%
Novembro	9,17%	7,29%	7,34%	5,76%	6,06%
Dezembro	7,97%	3,67%	5,38%	4,38%	4,41%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%

Na seqüência são apresentados os equacionamentos para determinação do número de operações de eclusagens ano em decorrência de taxas de crescimento em TkU, considerando as características de eficiência e perfil de carga para cada instalação. A equação (29) representa o cálculo do número de eclusagens para um instante de tempo posterior frente a uma taxa de crescimento. A equação (30) representa a conversão do número de eclusagens em carga efetiva (toneladas) em decorrência da multiplicação do fator de eficiência ou rendimento de cada instalação. A equação (30) representa a composição do cálculo da carga total movimentada em TkU. Este cálculo realizado através de um somatório das movimentações individuais das principais cargas movimentadas. Estas movimentações individualizadas (TkU) foram obtidas através da multiplicação da distância média de transporte versus percentual de participação no montante total transportado anualmente. O valor total de movimentação de carga (TkU) foi calibrada e parametrizada utilizando-se da curva de crescimento prevista pela Secretaria de Transportes do Estado de São Paulo.

$$N_{i,t} = N_{i,t-1} \times T_a \dots\dots\dots(29)$$

$$Wec_{i,t} = N_{i,t} \times Em_i \dots\dots\dots(30)$$

$$W_{TkU}_{i,t} = \sum_1^n (Wec_{i,t} \times Part_{com(a)} \times DMT_{com(a)}) \dots\dots\dots(31)$$

Onde:

- $N_{i,t}$ - Número de operações da eclusa i , no tempo t (ano);
- $N_{i,t-1}$ - Número de operações da eclusa i , no tempo anterior $t-1$ (ano);
- T_a - Taxa de crescimento anual;
- $Wec_{i,t}$ - Carga movimentada (toneladas) na eclusa i , no tempo t (ano);
- Em_i - Eficiência média operacional (ton/operação) na eclusa i ;

- $W_{TkU}_{i,t}$ - Toneladas por Kilômetro Útil da eclusa i , no tempo t (ano);
- $Part_{com(a)}$ - Participação percentual da commodity (a) na eclusa i , no tempo t (ano);
- $DMT_{com(a)}$ - Distância Média de Transporte na eclusa i , no tempo t (ano);

Para efeito de simulação foi considerado a restrição relativa à capacidade efetiva operacional de cada eclusa para intervalo de tempo mensal (capítulo 4.2.1.). O desenvolvimento do modelo de simulação possibilitou a determinação das demandas de utilização da eclusa (número de operações) para diversos cenários de crescimento. Premissas adotadas no modelo simulador:

- a) Não foram considerados os efeitos resultantes da formação de filas “teoria das filas”;
- b) Foram consideradas taxas de crescimento linear para todos os tipos de carga;
- c) As distâncias médias de transporte foram determinadas pela infraestrutura atual em operação;
- d) A eficiência operacional das instalações é representada pela relação do volume transportado pelo número de operações;

Através do módulo simulador de demanda hidroviária do solverAES, foram simuladas diversas taxas de crescimento, obtendo-se diversas curvas de demanda. Os resultados mostraram-se aderentes ao perfil de crescimento projetado pela Secretaria de Transporte do Estado de São Paulo. O cenário projetado para 2020 pelo Departamento Hidroviário prevê uma movimentação de 15 bilhões de TkU. As simulações mostraram que para ser atingida esta meta, será necessária uma taxa de crescimento médio anual de 26,5% ao ano.

Neste trabalho foram simulados três cenários básicos de crescimento da demanda hidroviária: 10, 15 e 26,5% ao ano. Para cada cenário foi calculado pelo simulador de demanda, o número de eclusagens necessárias por instalação, considerando-se os limites de capacidade efetiva. Os resultados estão apresentados de forma individualizada por taxa de crescimento: 10, 15 e 26,5% nas figuras 5.8, 5.9 e 5.10.

Observar que o aumento da taxa de demanda implica em uma antecipação do limite da capacidade efetiva de todas as instalações. Pelas características regionais de demanda, comentadas anteriormente para as eclusas de Barra Bonita e Bariri, observa-se que ambas estão suscetíveis a atingirem antecipadamente a saturação. Mesmo uma taxa de crescimento de 10% ao ano, imputa para as eclusas de Barra Bonita e Bariri limitações de capacidade efetiva para 2014 e 2016 respectivamente.

Para simulações com cenário de crescimento de 15% ao ano, as eclusas de Barra Bonita e Bariri antecipariam os limites de saturação para 2012 e 2014. Para uma taxa de crescimento de 26,5%, o que se aproximaria do potencial estratégico previsto como meta para absorção de 6% da movimentação de cargas pelo modal hidroviário, as eclusas de Barra Bonita e Bariri estariam no seu limite da capacidade efetiva em 2011 e 2012. As eclusas de Ibatinga e Promissão em 2014 e de Nova Avanhandava em 2016.

Esta situação deve ser alterada caso sejam implementadas ações de melhoria operacional nas vias e frota atuais, na busca de melhoria de eficiência. Também não podemos desconsiderar uma alteração deste cenário caso ocorra uma mudança no perfil de cargas transportadas.

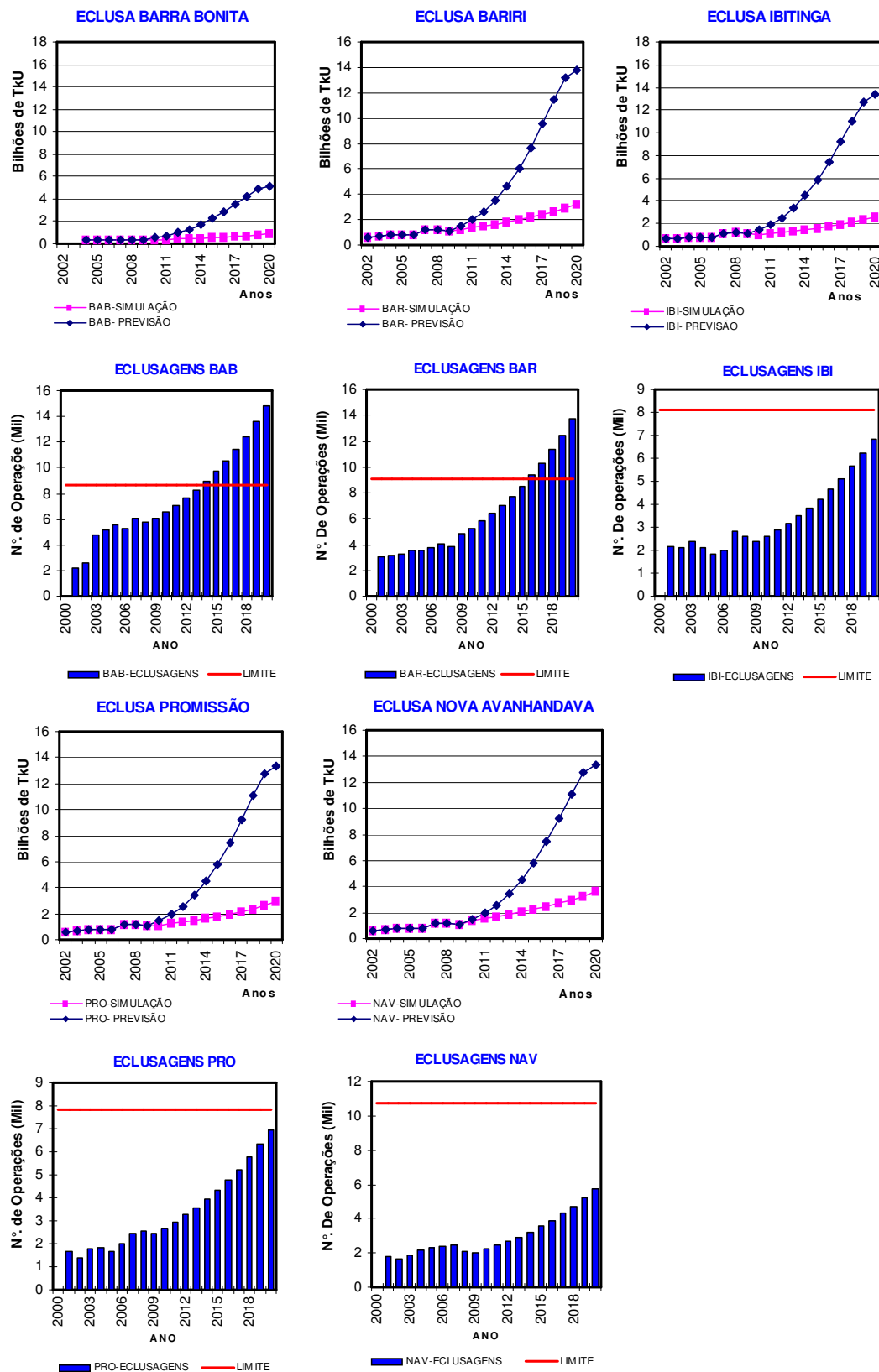


FIGURA 5.8 – Capacidade das Eclusas versus simulação de demanda (Taxa 10% ao ano).

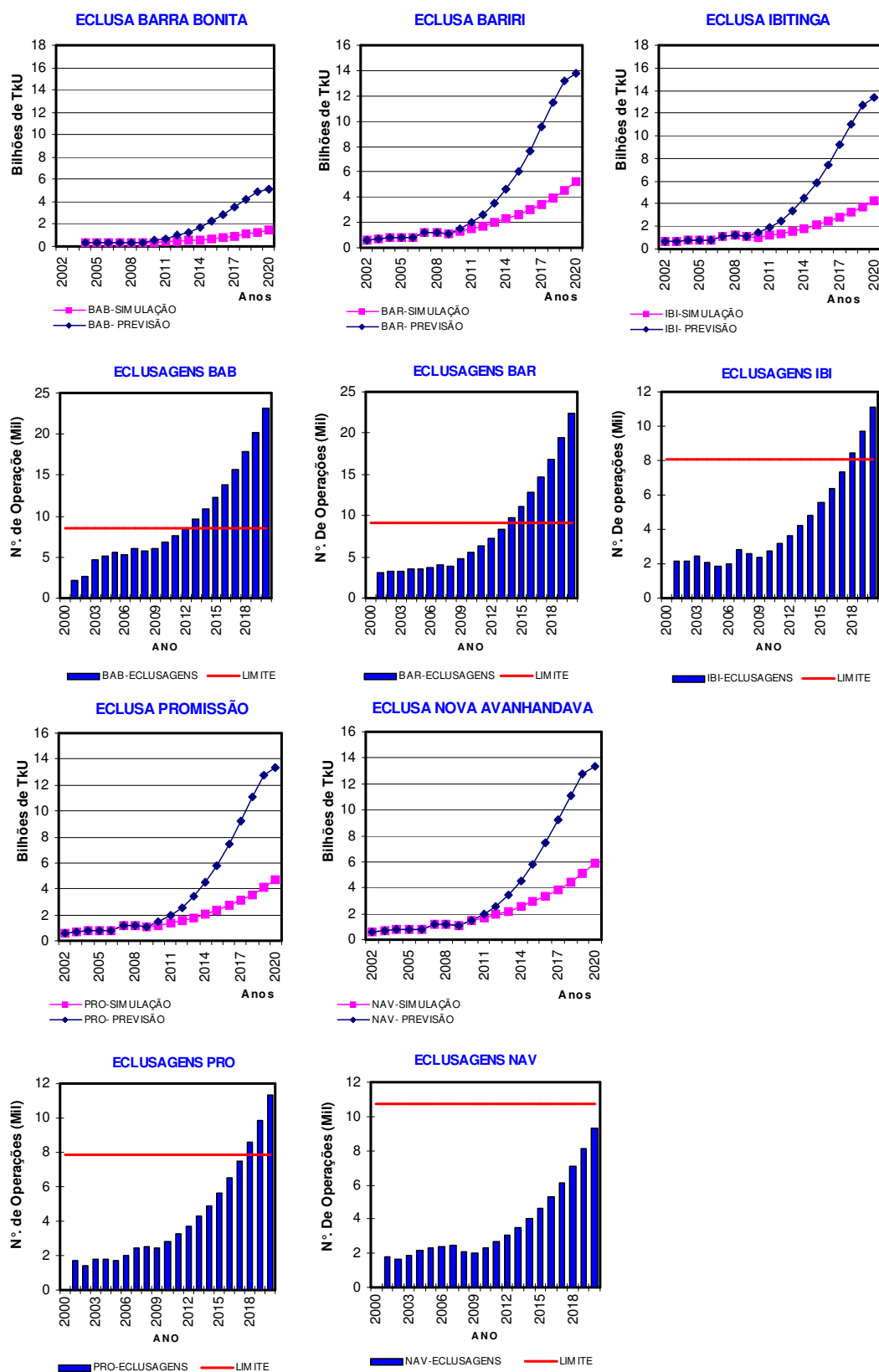


FIGURA 5.9 – Capacidade das Eclusas versus simulação de demanda (taxa 15% ao ano).

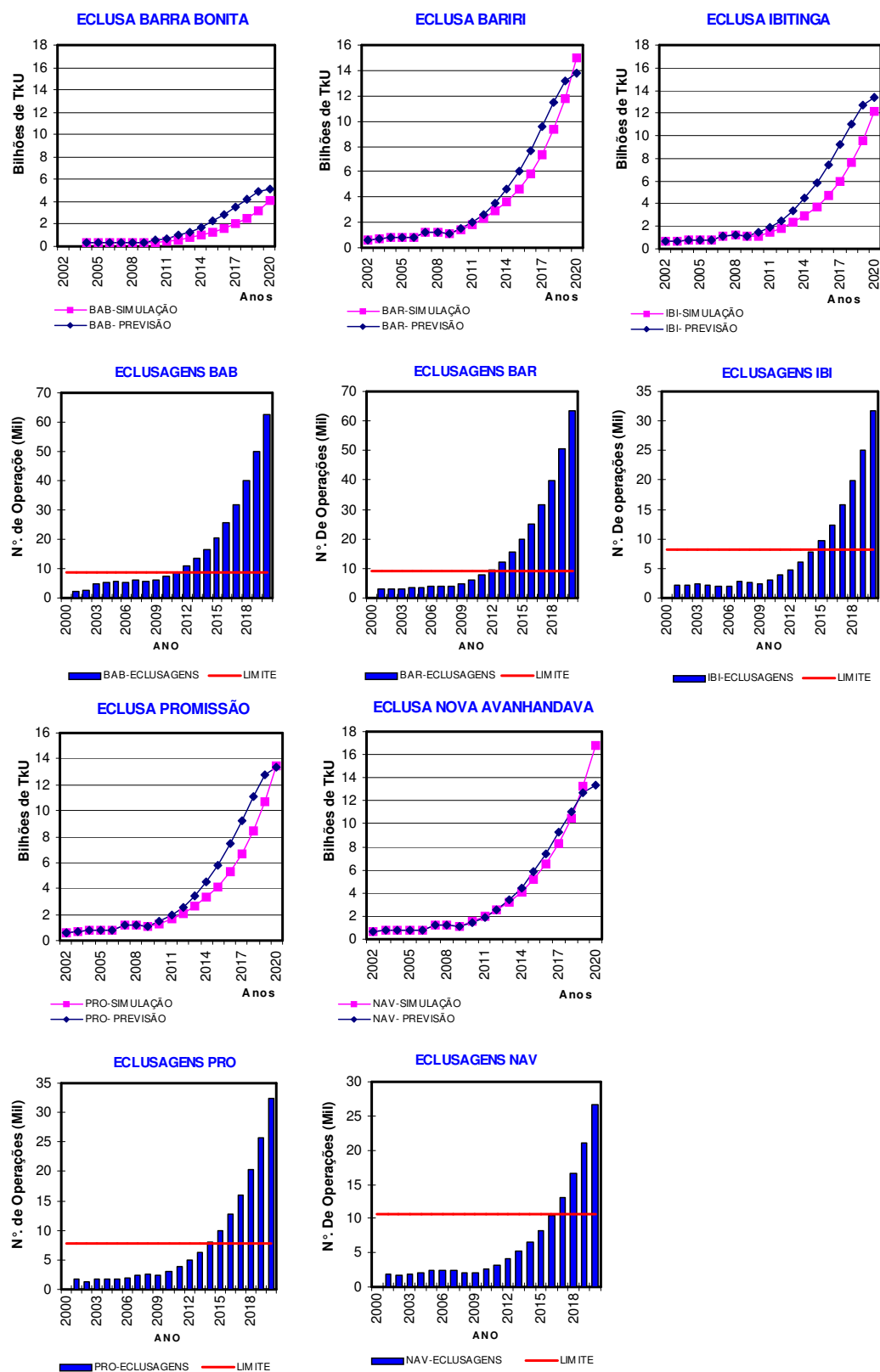


FIGURA 5.10 – Capacidade das Eclusas versus simulação de demanda (taxa 26,5% ao ano).

Os limites estabelecidos pela capacidade efetiva das eclusas podem ser observados através dos gráficos de envoltória da figura 5.11. Foram realizadas 27 simulações de taxa de crescimento hidrovial linear ano de 1 a 27%. A área em azul do gráfico representa a faixa de crescimento de demanda possível, sem limitação pela capacidade efetiva. A área de cor encarnada representa a região limitada pela capacidade efetiva das instalações.

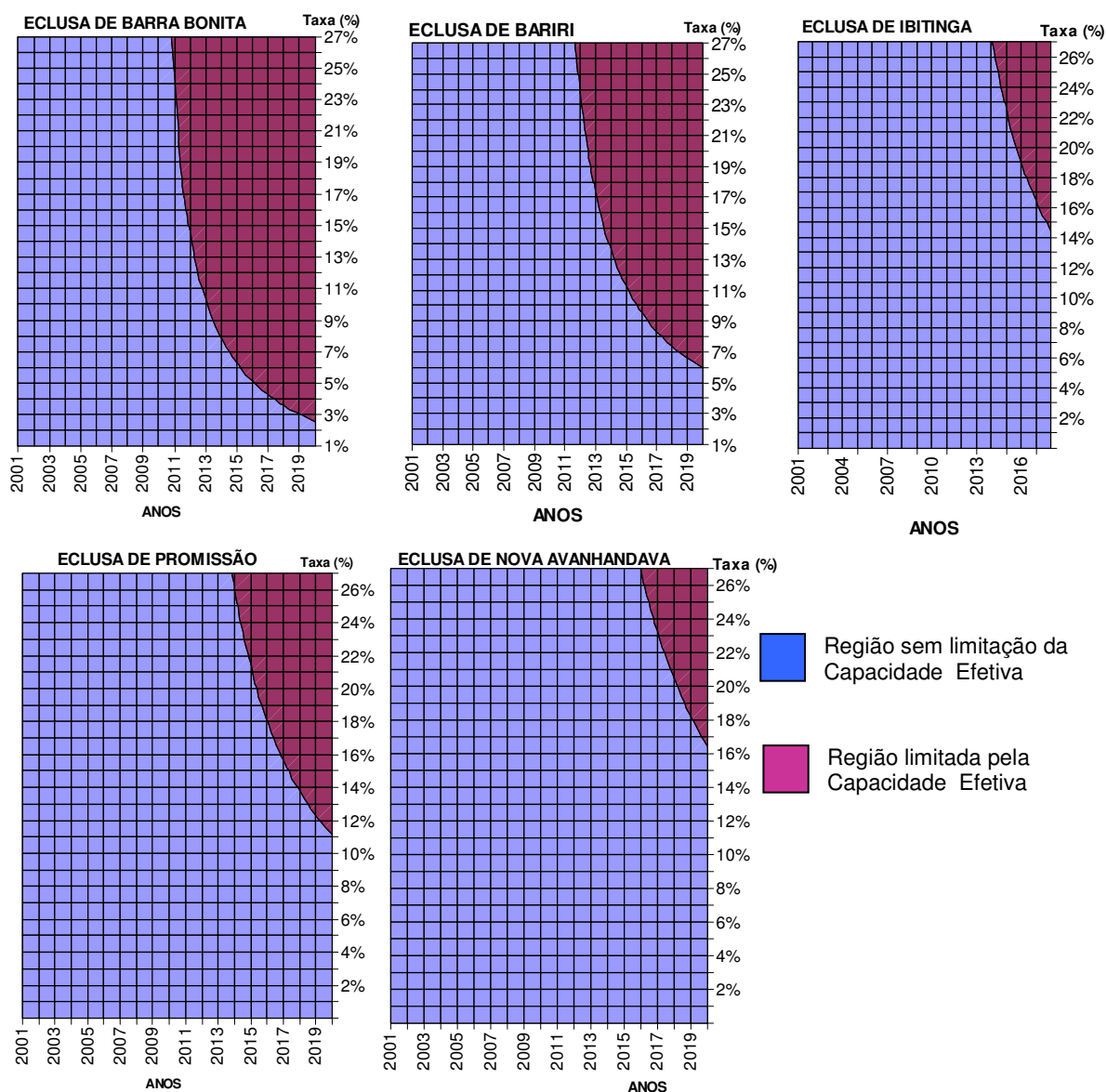


FIGURA 5.11 – Curvas de envoltória da Capacidade Efetiva - Taxa de crescimento x horizonte.

A seqüência de tabelas 5.9 a 5.11 apresentam os resultados (número de operações de eclusagens sazonalizada), esperada para cada eclusa em decorrência da taxa de crescimento adotada para 2011, 2015 e 2020. Estes resultados serão transformados em vazões “equivalentes de eclusagens”, sendo os “inputs” para o modelo de otimização/simulação hidroenergética de uso múltiplo para a cascata do rio Tietê. Os resultados foram agrupados em tabelas por taxa de crescimento média anual.

TABELA 5.9 - Número de operações – Simulação taxa de crescimento de 10% ao ano.

Mês	2011					2015					2020				
	BAB	BAR	IBI	PRO	NAV	BAB	BAR	IBI	PRO	NAV	BAB	BAR	IBI	PRO	NAV
Maio	644	736	289	318	311	717	760	423	466	455	717	760	619	653	666
Junho	619	702	272	277	248	717	760	399	406	364	717	760	584	594	532
Julho	633	687	302	298	224	717	760	442	436	328	717	760	647	638	480
Agosto	638	706	272	302	207	717	760	398	442	304	717	760	583	648	445
Setembro	610	615	220	253	177	717	760	323	370	260	717	760	472	542	380
Outubro	642	577	256	222	182	717	760	375	325	267	717	760	550	476	391
Novembro	647	423	213	170	147	717	620	312	249	215	717	760	456	365	315
Dezembro	563	213	156	129	107	717	312	228	189	156	717	457	334	277	229
Janeiro	311	36	26	27	28	429	52	39	39	41	602	77	57	57	61
Fevereiro	534	228	202	221	168	717	334	296	324	247	717	489	433	474	361
Março	693	462	408	449	352	717	677	597	653	515	717	760	675	653	755
Abril	698	539	374	388	353	717	760	548	569	517	717	760	675	653	757

TABELA 5.10 - Número de operações – Simulação taxa de crescimento de 15% ao ano.

Mês	2011					2015					2020				
	BAB	BAR	IB	PRO	NAV	BAB	BAR	IB	PRO	NAV	BAB	BAR	IB	PRO	NAV
Maio	692	760	316	348	340	717	760	552	608	594	717	760	675	653	893
Junho	664	760	298	303	271	717	760	521	530	475	717	760	675	653	830
Julho	680	751	330	325	245	717	760	577	569	428	717	760	675	653	749
Agosto	685	760	297	330	227	717	760	520	578	396	717	760	675	653	693
Setembro	654	672	241	276	194	717	760	421	483	339	717	760	675	653	593
Outubro	689	630	280	243	199	717	760	490	425	348	717	760	675	653	609
Novembro	695	463	233	186	160	717	760	407	325	281	717	760	675	569	491
Dezembro	604	233	171	141	117	717	407	298	247	204	717	712	522	432	357
Janeiro	347	41	30	30	32	563	72	53	53	56	717	125	92	93	99
Fevereiro	595	261	231	253	192	717	456	404	442	337	717	760	675	653	589
Março	717	528	466	513	402	717	760	675	653	704	717	760	675	653	893
Abril	717	616	428	444	403	717	760	675	653	706	717	760	675	653	893

TABELA 5.11 - Número de operações – Simulação taxa de crescimento de 26,5% ao ano.

Mês	2011					2015					2020				
	BAB	BAR	IB	PRO	NAV	BAB	BAR	IB	PRO	NAV	BAB	BAR	IB	PRO	NAV
Maio	717	760	382	421	411	717	760	675	653	893	717	760	675	653	893
Junho	717	760	360	366	328	717	760	675	653	841	717	760	675	653	893
Julho	717	760	399	394	296	717	760	675	653	759	717	760	675	653	893
Agosto	717	760	360	400	274	717	760	675	653	702	717	760	675	653	893
Setembro	717	760	291	334	234	717	760	675	653	600	717	760	675	653	893
Outubro	717	760	339	294	241	717	760	675	653	617	717	760	675	653	893
Novembro	717	560	281	225	194	717	760	675	576	497	717	760	675	653	893
Dezembro	706	282	206	171	141	717	721	528	438	362	717	760	675	653	893
Janeiro	441	54	40	40	43	717	140	103	103	110	717	357	263	264	282
Fevereiro	717	347	307	336	256	717	760	675	653	656	717	760	675	653	893
Março	717	703	621	653	535	717	760	675	653	893	717	760	675	653	893
Abril	717	760	569	591	537	717	760	675	653	893	717	760	675	653	893

5.4.6. Cenários Hidrológicos.

Os cenários hidrológicos foram determinados através de estudos estatísticos aplicados sobre as séries de vazões naturais de cada empreendimento. As séries de vazões históricas (1931 a 2008) foram obtidas junto ao ONS através de consulta ao site www.ons.org.br (ONS, 2010).

Para atendimento aos objetivos do projeto de avaliação dos impactos para o sistema de uso múltiplo (navegação e geração), optou-se pela simulação de 04 cenários hidrológicos distintos: cenário úmido, normal, seco e muito seco. Para determinação destas vazões foi utilizada a metodologia proposta por Lopes (2001).

Lopes avalia as distribuições de freqüências das séries de vazões naturais para os aproveitamentos do Parapanema e compara os resultados obtidos estatisticamente com a MLT (Média de Longo Termo). A MLT é usualmente utilizada pelo setor elétrico com referência para determinação dos tipos de cenários: úmido, normal e seco. Lopes demonstra através de seus estudos que o valor mediano obtido a partir das séries de vazões naturais, representaria melhor uma situação hidrológica classificada como “normal” esperado. Desta mesma forma, para caracterização dos cenários classificados como “secos” estariam mais bem representado, quando considerado como referência o 1º Quartil, ou seja, valor limite de vazão que é superado por 75% dos elementos da série natural de vazões. Para o cenário úmido considerou-se o valor representado pelo 3º Quartil, ou limite de vazão que é superado por apenas 25% dos elementos da série de vazões naturais.

Neste trabalho optou-se pela simulação de um cenário alternativo, denominado cenário “muito seco”. Neste caso específico foi considerado como referência o valor de vazões que são superadas por 95% dos elementos da série de vazão natural, ou denominado 5º percentil. A tabela 5.12 resume os resultados estatísticos calculados para as séries de vazões naturais (1931 a 2008), obtidas junto ao site do ONS (2009).

TABELA 5.12 – Série Estatística de Vazões Naturais – ONS (2009).

UHEs	Estatística	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MED	% Média
BAB	MIN	117	142	174	137	76	119	80	81	77	104	113	167	172	42,97%
	MED	672	734	620	405	322	314	248	213	228	282	304	460	400	100,00%
	MAX	1372	1939	1285	1112	946	2322	774	587	958	808	749	1142	1077	269,23%
	1ºQuartil	460	518	435	296	236	215	184	162	152	180	232	318	282	70,56%
	Mediana	631	674	594	391	288	251	231	194	191	239	284	439	367	91,73%
	3ºQuartil	850	897	765	461	367	324	274	248	267	332	358	566	476	118,89%
	Percentil (5%)	330	342	306	240	183	155	155	127	130	154	173	206	254	58,32%
BAR	MIN	129	188	226	182	92	135	102	104	89	116	142	192	206	45,74%
	MED	752	824	698	460	366	357	281	242	259	315	341	512	451	100,00%
	MAX	1522	2108	1364	1278	1024	2614	837	643	1052	890	832	1271	1193	264,85%
	1ºQuartil	517	578	500	348	278	253	210	187	176	205	256	356	322	71,42%
	Mediana	706	753	679	441	331	285	264	225	216	272	319	491	415	92,07%
	3ºQuartil	935	1007	851	532	417	374	309	277	310	362	396	612	532	117,98%
	Percentil (5%)	369	372	343	269	207	175	174	148	150	172	191	231	284	58,38%
IBI	MIN	198	265	287	227	124	171	140	127	114	148	177	223	254	46,46%
	MED	891	973	831	565	452	438	353	306	323	385	416	619	546	100,00%
	MAX	1816	2532	1593	1523	1202	2810	1063	742	1275	1106	1032	1435	1421	260,27%
	1ºQuartil	646	720	605	425	348	316	265	233	234	262	322	430	400	73,32%
	Mediana	839	903	808	544	428	372	333	291	285	334	384	587	509	93,20%
	3ºQuartil	1132	1162	993	662	515	458	394	352	381	437	481	743	642	117,64%
	Percentil (5%)	417	415	414	328	248	226	214	189	201	199	231	295	363	62,43%
PRO	MIN	219	291	360	286	156	209	166	154	135	164	222	260	298	44,82%
	MED	1079	1180	1016	688	550	529	432	378	398	467	502	748	664	100,00%
	MAX	2199	3169	1909	1759	1413	3069	1228	960	1466	1348	1278	1619	1666	250,93%
	1ºQuartil	772	873	740	532	427	387	334	289	278	315	382	503	486	73,19%
	Mediana	1015	1094	971	661	523	458	412	362	336	422	473	698	618	93,13%
	3ºQuartil	1389	1415	1236	805	642	585	481	423	485	538	578	894	789	118,85%
	Percentil (5%)	516	463	506	386	300	260	253	222	231	242	282	328	418	59,76%
NAV	MIN	225	312	370	284	162	217	172	160	139	169	238	273	305	42,92%
	MED	1164	1274	1092	738	585	565	459	400	421	497	536	801	711	100,00%
	MAX	2591	3602	2192	1919	1550	3399	1308	1029	1487	1442	1372	1987	1854	260,75%
	1ºQuartil	802	934	790	566	457	409	351	306	296	332	400	531	514	72,34%
	Mediana	1106	1153	1028	705	555	485	440	385	359	453	506	745	660	92,78%
	3ºQuartil	1461	1495	1331	864	693	630	515	459	509	570	630	948	842	118,40%
	Percentil (5%)	538	489	523	410	316	263	260	226	240	255	301	344	430	57,58%

Para determinação do volume de espera para controle de cheias foi utilizado os estudos de previsão e controle de cheios desenvolvidos anualmente pelo ONS (2010/2011), disponível no site www.ons.org.br. O controle de previsão de cheia é

estudado apenas para as usinas tipo “reservatório”. Para nosso estudo, as usinas de Barra Bonita e Promissão. A tabela 5.13 resume os níveis metas recomendados para amortecimento e controle de cheias.

TABELA 5.13 – Controle de cheias ONS – % Volume do Reservatório.

Meses	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
UHE Barra Bonita	96,88	100	100	100	100	100	87,22	82,85	85,19	87,92	90,65	96,88
UHE Promissão	100	100	100	100	100	100	77,49	72,51	74,2	83,6	90,79	100

5.5. Usinas Hidrelétricas – AES Tietê S.A.

As usinas hidrelétricas objeto deste estudo são operadas e mantidas pela concessionária de serviços públicos de energia AES Tietê. A Figura 5.12, ilustra o esquema de repartição de quedas do rio Tietê para os aproveitamentos de uso múltiplo (navegação e geração). As informações necessárias para modelagem estão dispostas na tabela 5.14

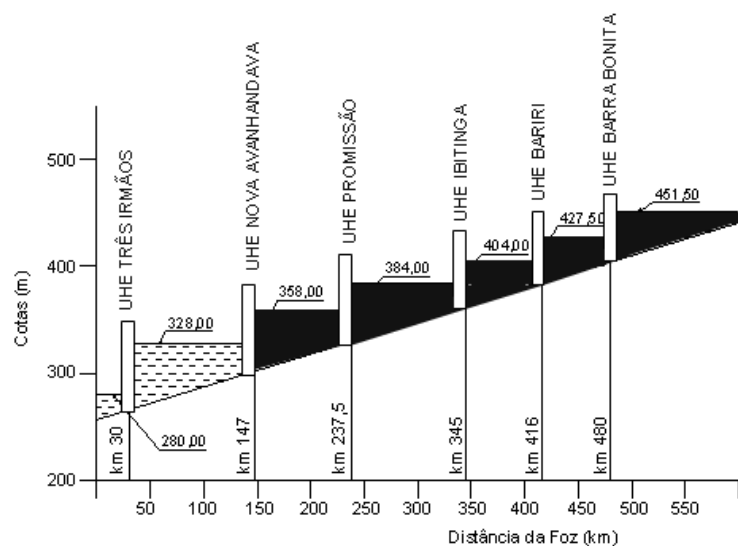


FIGURA 5.12 - Perfil de repartição de quedas para Cascata do Rio Tietê.

TABELA 5.14 – Características técnicas Usinas Hidrelétricas AES Tietê.

UHEs	Barra Bonita	Bariri	Ibitinga	Promissão	Nova Avanhandava
LOCALIZAÇÃO					
Curso d' Água:	Rio Tietê	Rio Tietê	Rio Tietê	Rio Tietê	Rio Tietê
Município Margem Direita:	Barra Bonita	Bariri	Ibitinga	José Bonifácio	Buritama
Município Margem Esquerda:	Igaraçu do Tietê	Boracéia	Iacanga	Promissão	Brejo Alegre
CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO					
Projeto:	TECHINT	S.EDSON /	BRASCONSULT	BRASCONSULTE.	IESA.
Construção:	TENCO S.A.	C. CORRÊA	CETENCO	TENCO.	CBPO.
PERÍODO CONSTRUTIVO					
Início das obras civis:	1957	1959	1963	1966	1979
Última máquina:	1964	1969	1969	1977	1985
NÍVEIS OPERACIONAIS					
Montante - Na Max. Max	453	428,5	405	385,3	358,5
Montante - Na Max. Normal:	451,5	427,5	404	384	358
Montante - Min. Normal:	439,5	426,5	403,5	379,7	356
Jusante - Na Max. Max.	434	408,5	385	361,6	331,3
Jjsante - Na Max. Normal:	428	405	384,75	359,5	328,2
Jusante -Min. Normal:	426	403,5	382,55	355	324,35
RESERVATÓRIO					
Comprimento (km)	150	64	76	125	55
Área (Km ²) - Na Max. Max.:	334	72,5	126,5	550	218,7
Área (Km ²) - Na Max. Normal:	308	62,58	113,5	530	210
Área (Km ²) - Min. Normal:	124	57,25	108,5	456	184,37
Volume (h m ³) - Na Max. Max.:	3053	544	985	8110	2.720
Volume (h m ³) - Na Max. Normal:	2566	544	985	7404	2.720
Volume (h m ³) - Min. Mínimo:	569	544	985	5280	2720
TURBINA					
Turbina:	Kaplan	Kaplan	Kaplan	Kaplan	Kaplan
Quantidade:	4	3	3	3	3
Engolimento. Nominal (m ³ /s)	178	200	239	374	400
Perdas Hidráulicas %	0,93	0,9	1,4	2,12	1,79
Queda Nominal (m)	23,5	24	21,45	27,4	29,7
GERADOR					
Pot. Nominal(MW):	35	48	43,8	88	115,8
Potência Instalada:	140	146	133,23	267,67	347,4
VERTEDOIRO					
Superfície	5	6	7	1	4
Fundo	-	2	3	5	-
Total (m ³ /s)	3.521	3.720	4.480	6.500	7.555

TABELA 5.14 – Características técnicas Usinas Hidrelétricas AES Tietê.

UHes		Barra Bonita	Bariri	Ibitinga	Promissão	Nova Avanhandava
POLINÔMIOS						
Cota/Volume	a0	4,33E+02	4,28E+02	4,04E+02	3,70E+02	3,58E+02
	a1	1,50E-02	0,00E+00	0,00E+00	-5,25E-04	0,00E+00
	a2	-6,71E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,08E-06	0,00E+00
	a3	1,76E-09	0,00E+00	0,00E+00	-1,60E-10	0,00E+00
	a4	-1,70E-13	0,00E+00	0,00E+00	7,93E-15	0,00E+00
Jusante/vazão defluente	b0	4,28E+02	4,04E+02	3,79E+02	3,58E+02	3,23E+02
	b1	-8,05E-04	4,80E-04	2,26E-03	-2,41E-04	4,31E-03
	b2	3,08E-06	1,56E-06	1,96E-07	5,60E-07	-2,13E-06
	b3	-1,35E-09	-8,13E-10	-3,24E-10	-1,23E-10	5,68E-10
	b4	1,90E-13	1,22E-13	5,88E-14	8,03E-15	-5,38E-14

5.6. Simulações.

Os cenários foram simulados no modelo de otimização e simulação desenvolvido neste estudo chamado solver AES hidrovia. Os vários cenários simulados foram resultados de um produto combinatório entre as três variáveis de interesse principal: variável hidrológica, cenários de crescimento da demanda hidroviária e horizonte de interesse. A figura 5.13 ilustra as variáveis envolvidas e modelo de combinação utilizado.

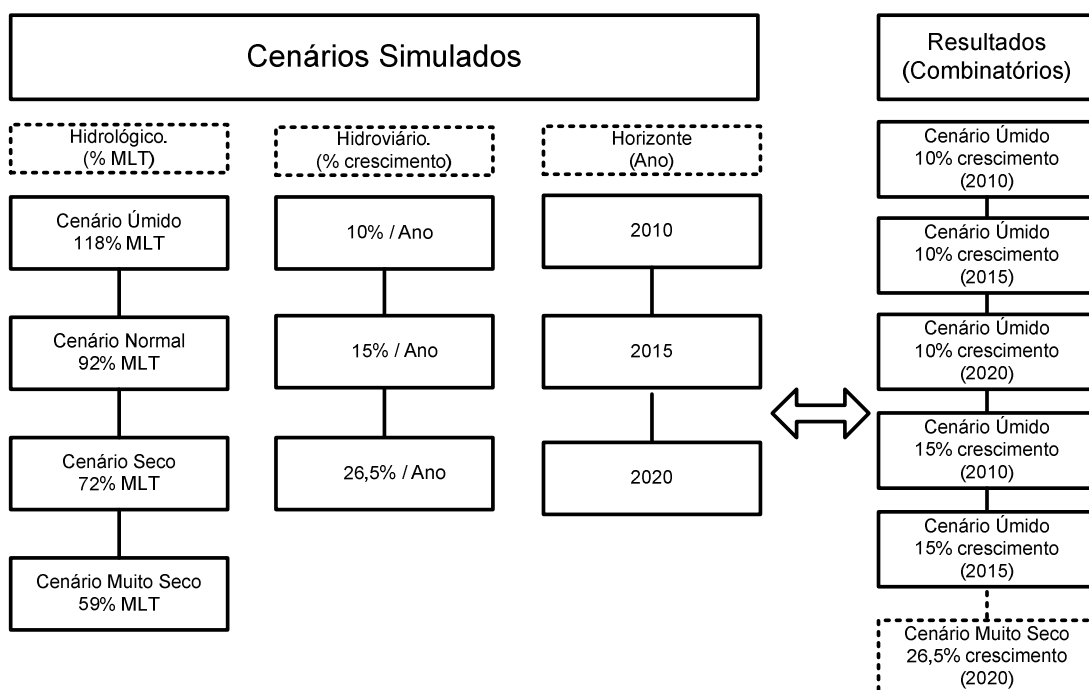


FIGURA 5.13 - Diagrama combinatório de cenários.

O horizonte de interesse para obtenção dos resultados pelo modelo é anual, porém, com discretização de resultados mensais. Neste caso foram considerados três períodos de interesse: (2011/12, 2015/16 e 2019/20). Para uma melhor representação gráfica dos efeitos da sazonalidade hidrológica as simulações seguiram o calendário hidrológico (abril a março). A combinação destas variáveis resultaram em 36 cenários combinatórios para simulação/otimização, apresentados na tabela 5.15.

Em uma segunda etapa, os 36 cenários de simulação propostos foram simulados novamente sem as restrições de nível impostas pela utilização da navegação hidroviária. Esta nova rodada de simulação teve como objetivo principal avaliar os possíveis impactos resultantes de uma flexibilização das restrições de nível em decorrência de uma contingência energética. Desta forma foi simulado um total de 72 cenários.

TABELA 5.15 - Cenários simulados.

.Cenários	Hidroviário (taxa de crescimento ao ano)								
Hidrológicos	10%	15%	26,5%	10%	15%	26,5%	10%	15%	26,5%
Úmido	2011	2011	2011	2015	2015	2015	2020	2020	2020
Normal	2011	2011	2011	2015	2015	2015	2020	2020	2020
Seco	2011	2011	2011	2015	2015	2015	2020	2020	2020
Muito Seco	2011	2011	2011	2015	2015	2015	2020	2020	2020

6. Resultados.

Os resultados obtidos através do módulo solver do modelo solver AES para os 72 cenários estão apresentados em formato de tabelas (tabelas 6.1 a 6.3) e representações gráficas (figuras 6.1 a 6.12).

As tabelas foram estruturadas para facilitar a comparação entre os resultados, considerando as simulações realizadas para os cenários “com” e “sem” restrições de nível operacional para navegação. Os resultados também foram agrupados em função da situação hidrológica: úmida, normal, seco e muito seco, além do horizonte de interesse (2011/12, 2015/16 e 2019/20).

Os resultados estão expressos em MW médio mensais. O índice adimensional expressos na coluna “FO” representa o somatório mensal das diferenças quadráticas entre a curva de demanda e de produção mensal para as usinas da cascata do rio Tietê. Esta medida representa um indicador de performance do modelo. Quanto menor for este índice, melhor será a solução do modelo na busca pela minimização da diferença quadrática entre a curva de demanda e a produção energética.

TABELA 6.1 - Resultados da simulação – 2011/2012.

Cenário Hidrológico	Taxa Crescimento	Com Restrição		Sem Restrição		Com Restrição	Sem Restrição
		MWmédio	FO	MWmédio	FO	dif %	dif %
Úmido	10	610	2.211.667	610	2.141.778	0,0%	-3,2%
Úmido	15	608	2.227.170	610	2.153.529	0,3%	-3,3%
Úmido	26,5	606	2.250.100	607	2.179.924	0,2%	-3,1%
Normal	10	479	3.481.512	477	3.366.595	-0,4%	-3,3%
Normal	15	477	3.501.110	476	3.385.707	-0,2%	-3,3%
Normal	26,5	475	3.530.927	475	3.416.944	0,0%	-3,2%
Seco	10	361	5.021.842	360	5.002.121	-0,3%	-0,4%
Seco	15	360	5.046.457	359	5.025.366	-0,3%	-0,4%
Seco	26,5	357	5.086.003	356	5.065.225	-0,3%	-0,4%
Muito Seco	10	231	2.319.257	231	2.319.257	0,0%	0,0%
Muito Seco	15	229	2.336.302	229	2.336.302	0,0%	0,0%
Muito Seco	26,5	226	2.364.516	226	2.364.516	0,0%	0,0%

TABELA 6.2 - Resultados da simulação – 2015/2016.

Cenário Hidrológico	Taxa Crescimento	Com Restrição		Sem Restrição		Com Restrição	Sem Restrição
		MWmédio	FO	MWmédio	FO	dif %	dif %
Úmido	10	603	2.282.075	604	2.215.369	0,2%	-2,9%
Úmido	15	604	2.279.768	604	2.212.038	0,0%	-3,0%
Úmido	26,5	600	2.319.966	601	2.255.829	0,2%	-2,8%
Normal	10	472	3.569.738	470	3.460.772	-0,4%	-3,1%
Normal	15	472	3.568.486	470	3.455.430	-0,4%	-3,2%
Normal	26,5	468	3.620.507	466	3.511.410	-0,4%	-3,0%
Seco	10	353	5.139.027	353	5.119.779	0,0%	-0,4%
Seco	15	354	5.134.098	353	5.113.405	-0,3%	-0,4%
Seco	26,5	349	5.203.183	349	5.183.560	0,0%	-0,4%
Muito Seco	10	223	2.402.114	223	2.402.114	0,0%	0,0%
Muito Seco	15	223	2.398.392	223	2.398.392	0,0%	0,0%
Muito Seco	26,5	219	2.448.332	219	2.448.332	0,0%	0,0%

TABELA 6.3 - Resultados da simulação – 2019/2020.

Cenário Hidrológico	Taxa Crescimento	Com Restrição		Sem Restrição		Com Restrição	Sem Restrição
		MWmédio	FO	MWmédio	FO	dif %	dif %
Úmido	10	601	2.305.579	602	2.240.896	0,2%	-2,8%
Úmido	15	600	2.319.233	601	2.255.020	0,2%	-2,8%
Úmido	26,5	598	2.333.530	599	2.270.802	0,2%	-2,7%
Normal	10	469	3.600.120	467	3.492.152	-0,4%	-3,0%
Normal	15	468	3.618.946	466	3.510.025	-0,4%	-3,0%
Normal	26,5	466	3.638.722	464	3.533.759	-0,4%	-2,9%
Seco	10	351	5.178.500	350	5.159.087	-0,3%	-0,4%
Seco	15	349	5.201.515	349	5.181.391	0,0%	-0,4%
Seco	26,5	347	5.230.242	347	5.211.168	0,0%	-0,4%
Muito Seco	10	220	2.430.402	220	2.430.402	0,0%	0,0%
Muito Seco	15	219	2.447.069	219	2.447.069	0,0%	0,0%
Muito Seco	26,5	216	2.482.974	216	2.475.606	0,0%	-0,3%

As saídas gráficas do modelo estão apresentadas nas figuras 6.1 a 6.12. Para facilitar a interpretação dos resultados gráficos e a comparação entre os diversos cenários e tabelas 6.1 a 6.3, foi mantida a mesma estrutura de agrupamento. Na seqüência são apresentados os detalhes da disposição e informação gráfica:

- a) Cada figura agrupa 12 simulações gráficas, sendo, 06 simulações de trajetória de volumes (%) para os reservatórios de Barra Bonita e Promissão com discretização mensal (ano hidrológico). Seis gráficos apresentando a curvas da produção total de energia para a cascata do rio Tietê, em MW médios, Curva de demanda (percentual da parcela energia prevista para a região Sudeste – limite superior) e curva de demanda da energia assegurada para a cascata do rio Tietê.
- b) Cada figura agrupa os resultados obtidos para uma mesma situação hidrológica: úmida, normal, seca ou muito seca, em um determinado horizonte de interesse (2011/12; 2015/16 ou 2019/20);
- c) A coluna de gráficos a esquerda representa as simulações realizadas para os cenários com imposição de restrição de nível, para atendimento dos requisitos da navegação hidroviária. A coluna da direita representa os resultados para mesmo cenário de simulação, porém, sem as restrições de limitação de nível;

Na seqüência são apresentadas as 12 figuras 6.1 a 6.12, com os resultados gráficos do comportamento da produção total de geração da cascata do rio Tietê e a comportamento da trajetória dos volumes das UHEs Barra Bonita e Promissão (reservatórios).

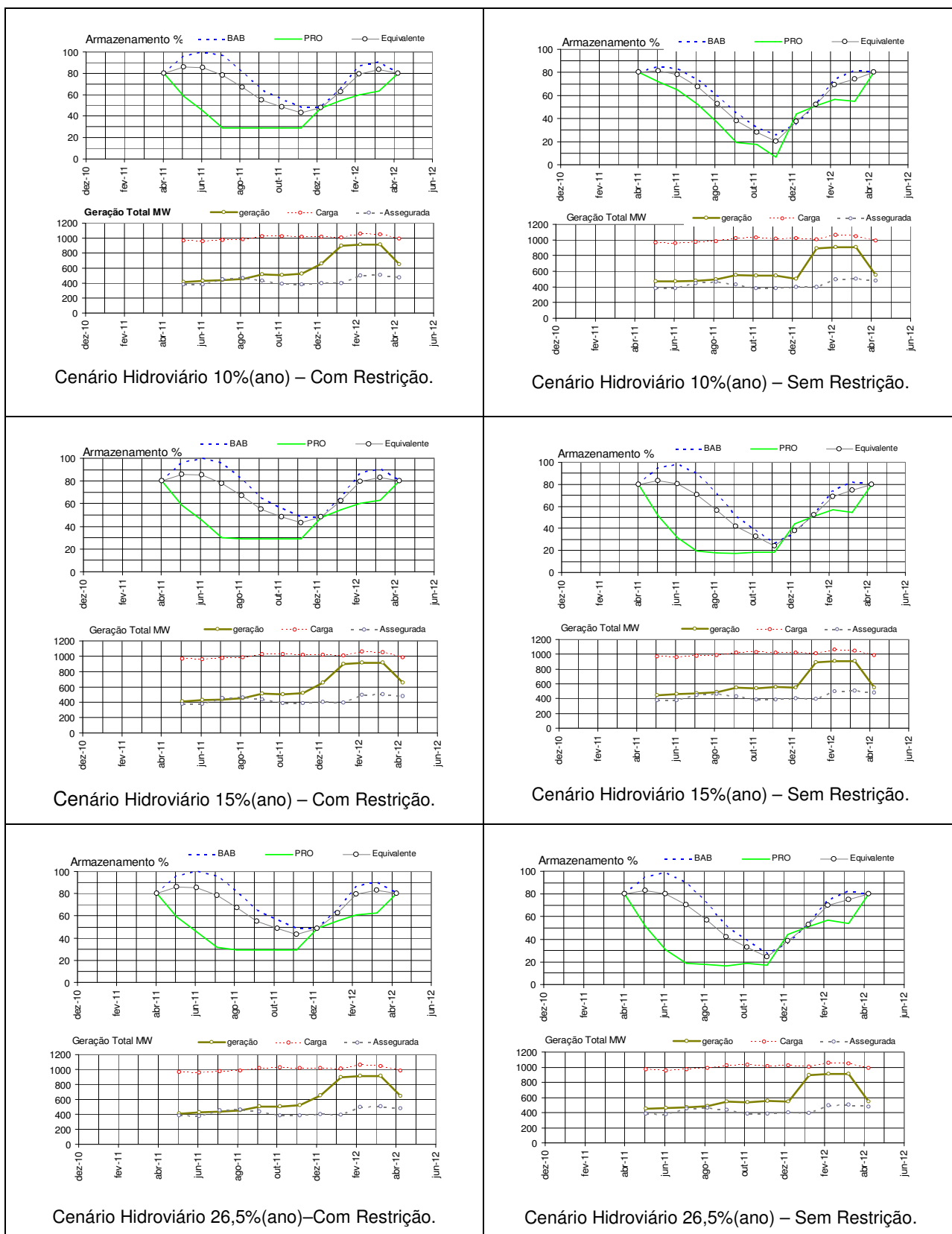


FIGURA 6.1 - Cenário Hidrológico “Úmido” (3º Quartil -118% MLT) – 2011/2012

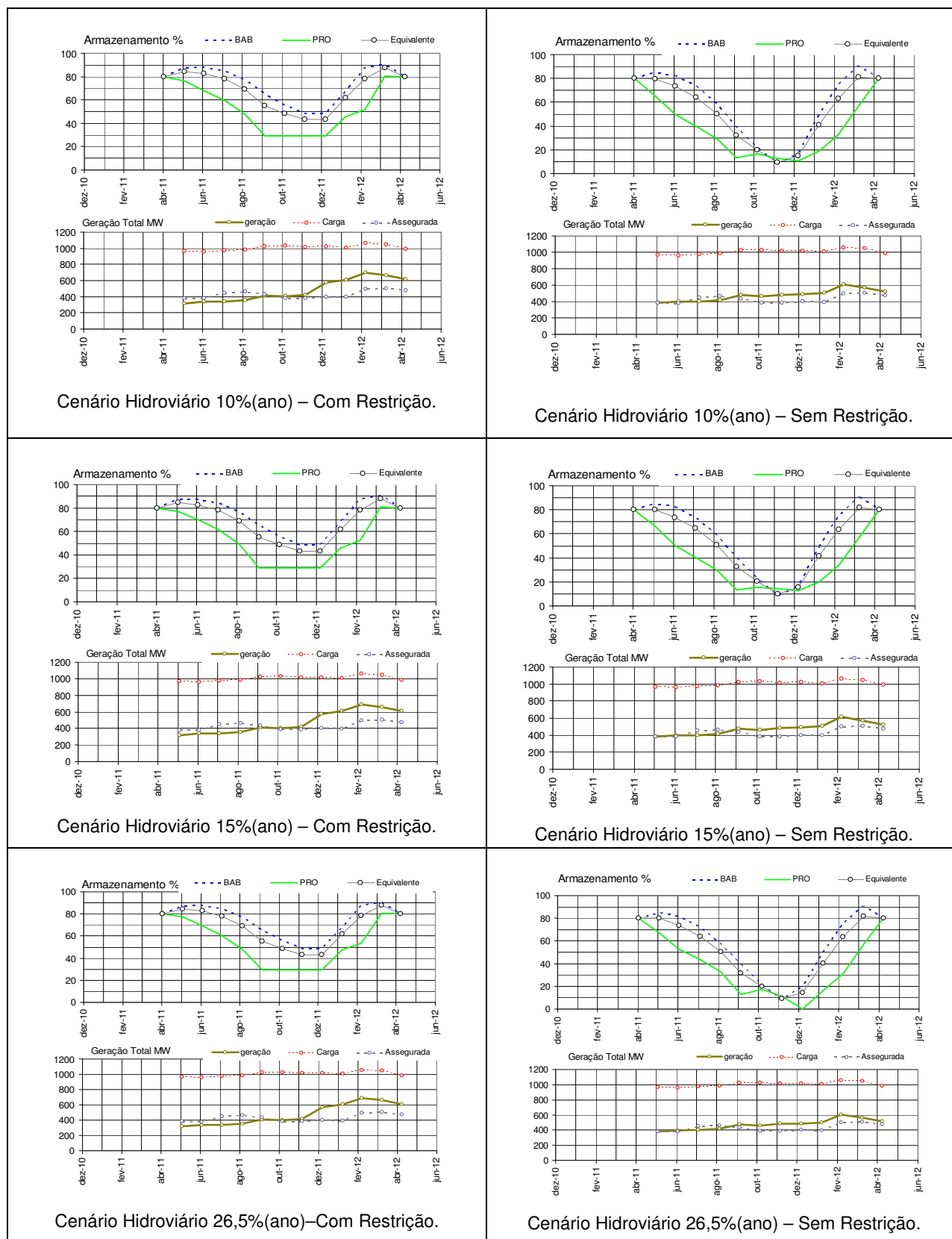


FIGURA 6.2 - Cenário Hidrológico “Normal” (Mediana 93% MLT) – 2011/2012

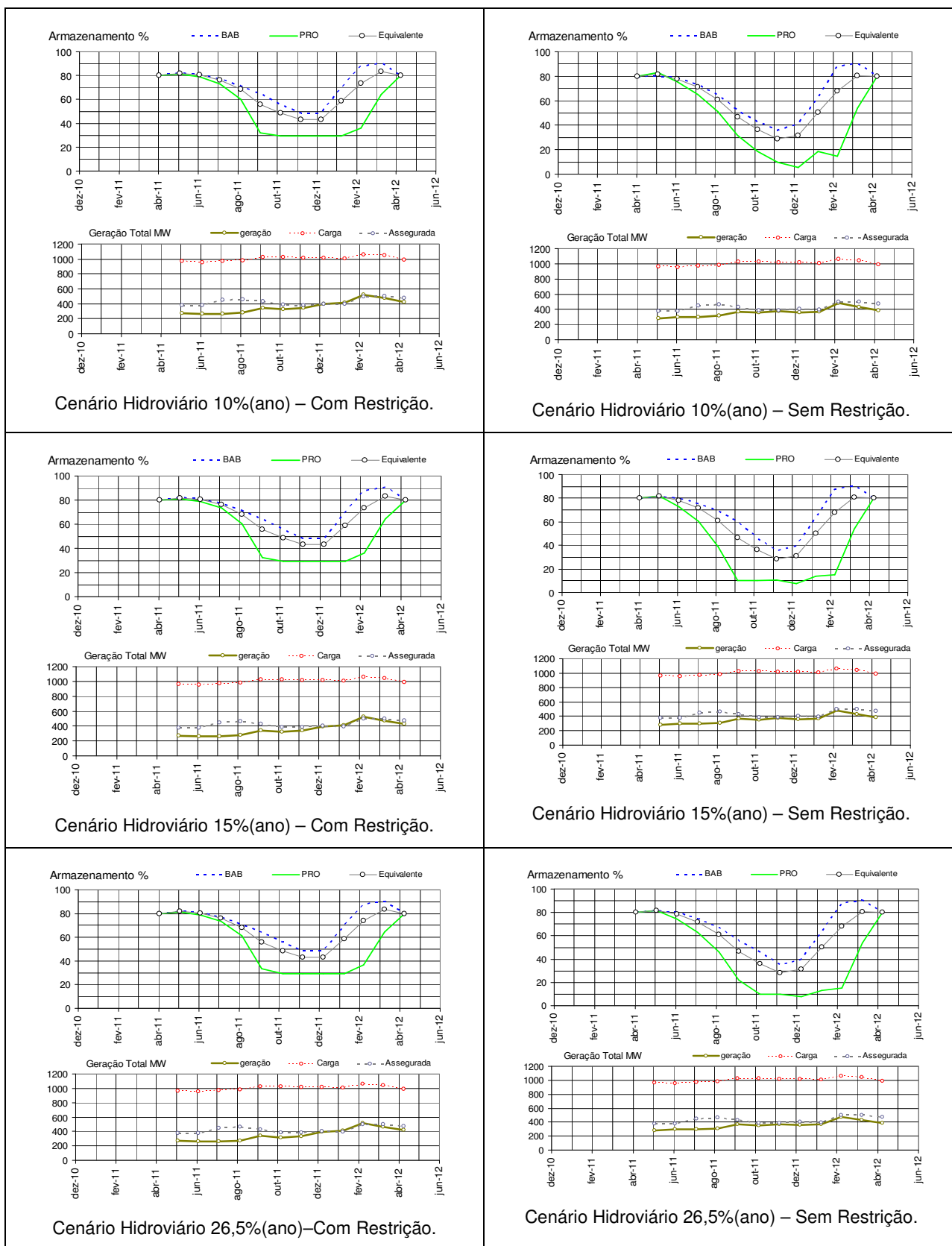


FIGURA 6.3 - Cenário “Hidrológico Seco” (1ºQuartil -73% MLT) – 2011/2

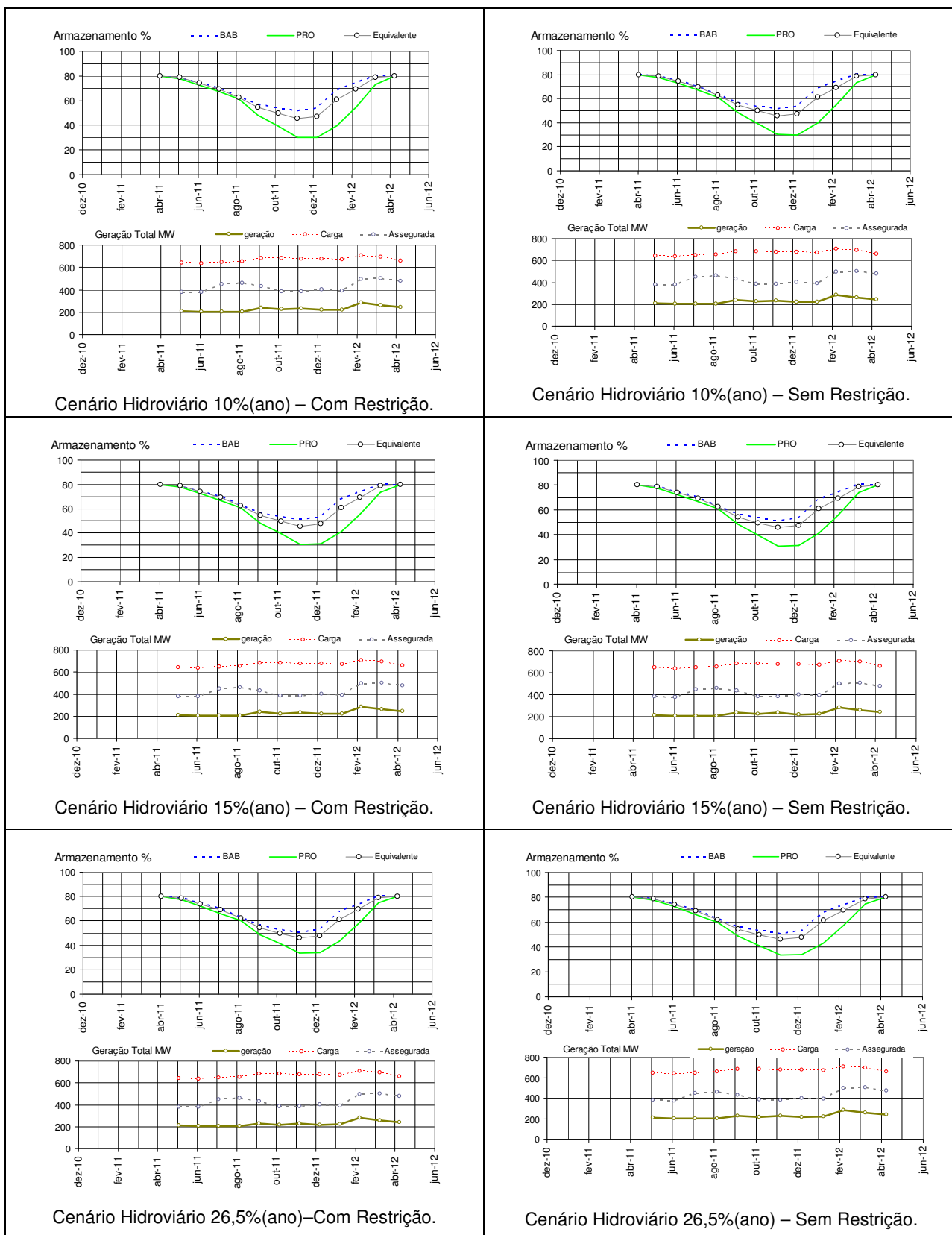


FIGURA 6.4 - Cenário Hidrológico “Muito Seco” (5° Percentil - 58% MLT) – 2011/2012

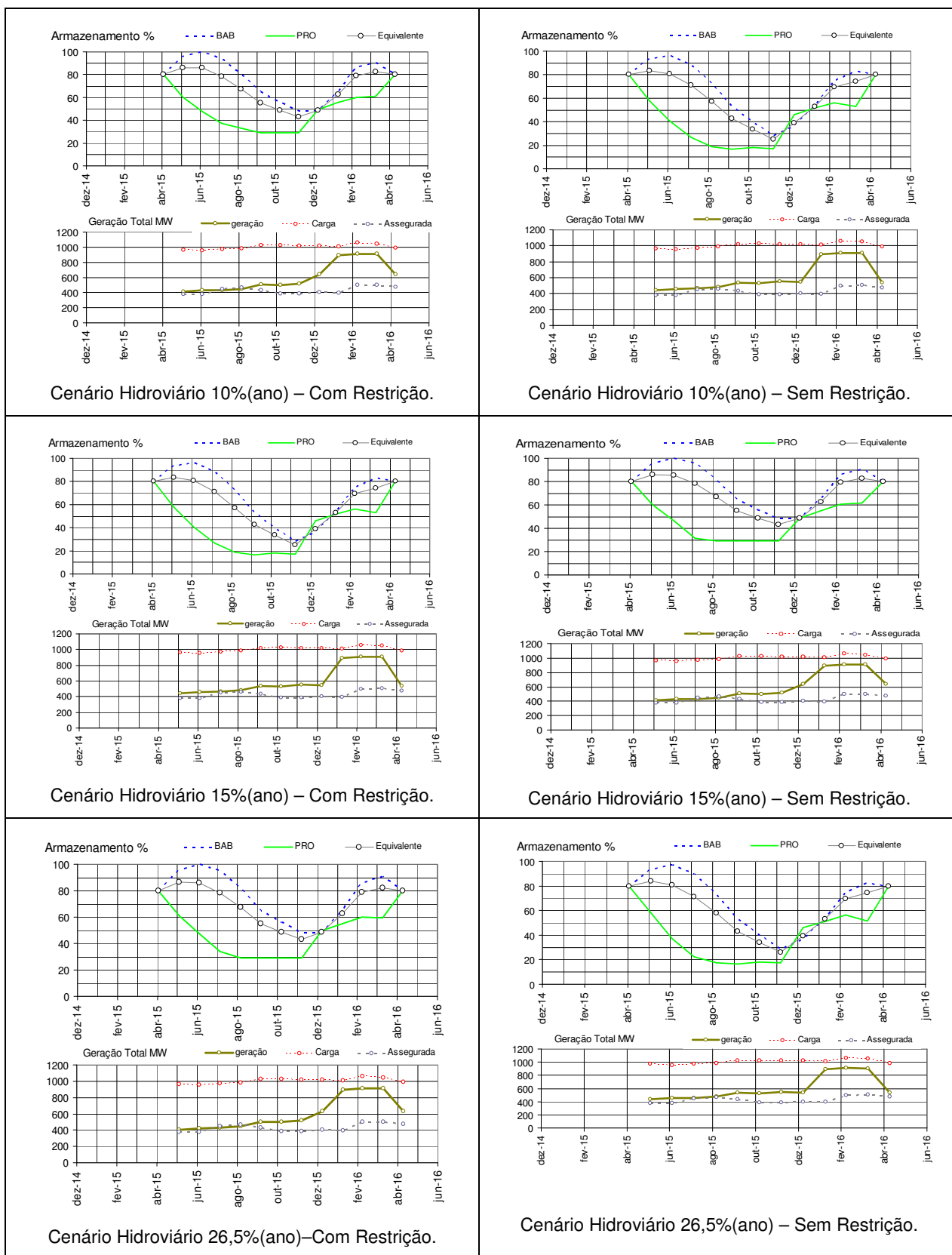


FIGURA 6.5 - Cenário Hidrológico “Úmido” (3º Quartil -118% MLT) – 2015/2016

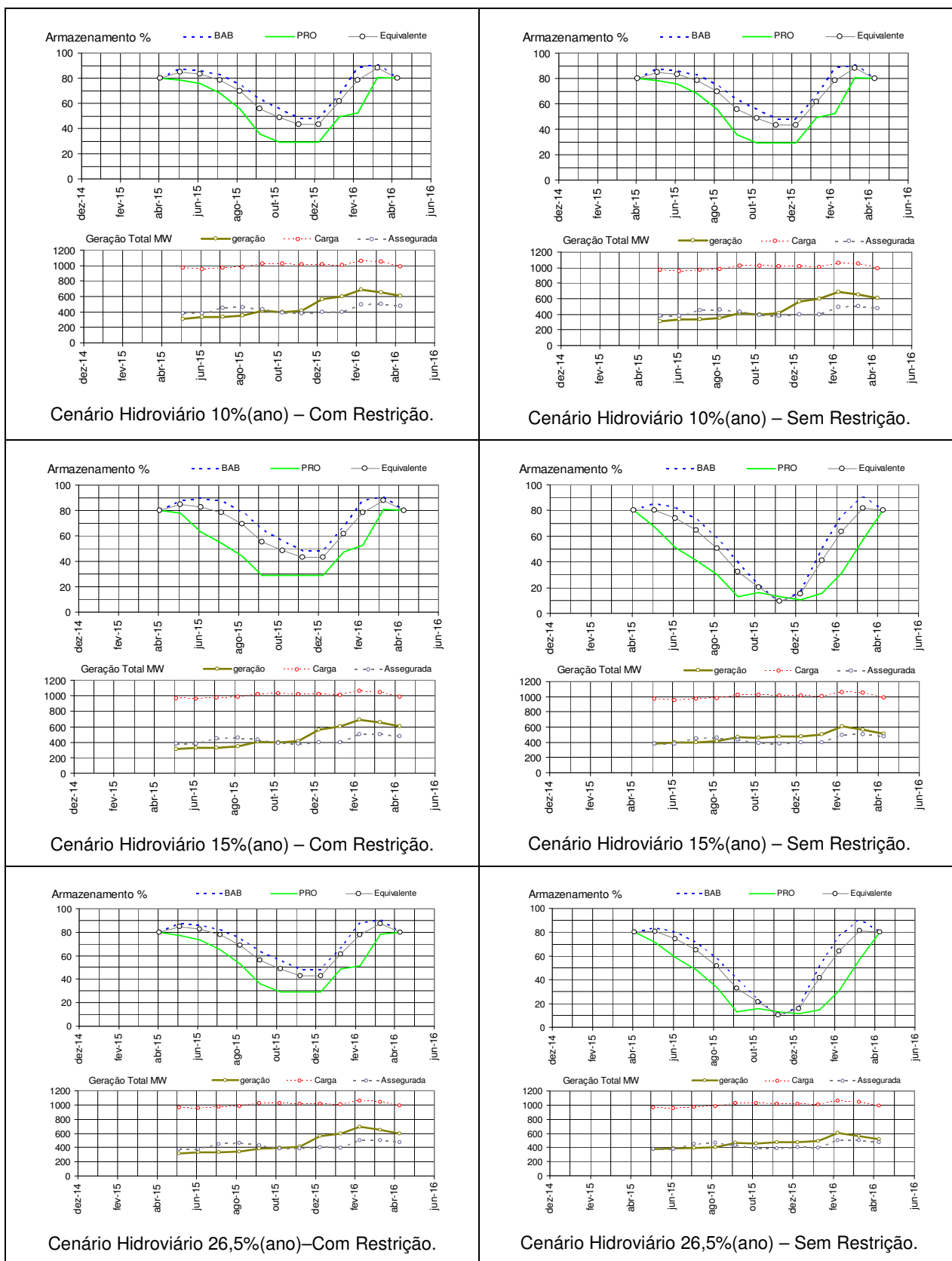


FIGURA 6.6 - Cenário Hidrológico “Normal” (Mediana -93% MLT) – 2015/2016

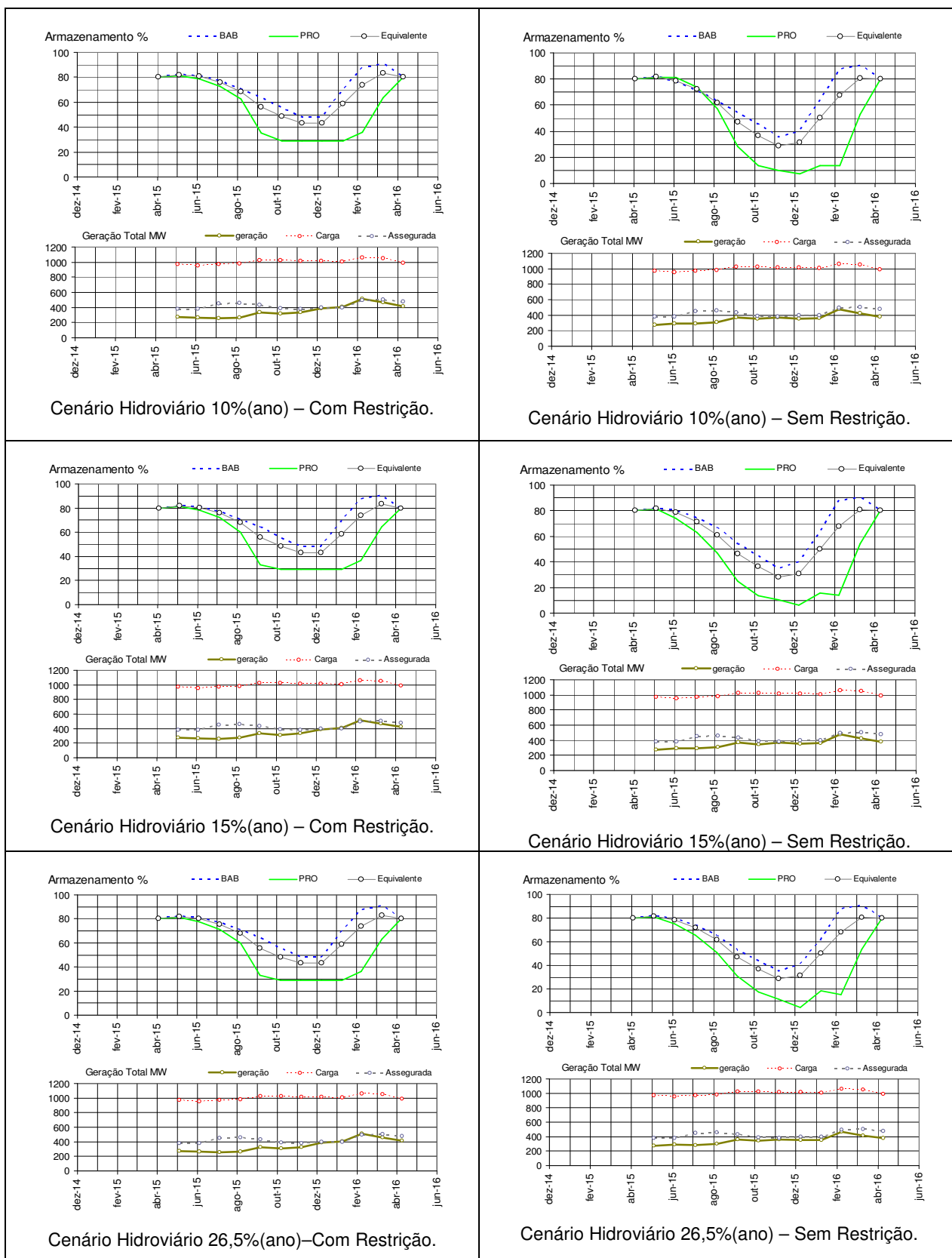


FIGURA 6.7 - Cenário Hidrológico “Seco” (Mediana -73% MLT) – 2015/2016

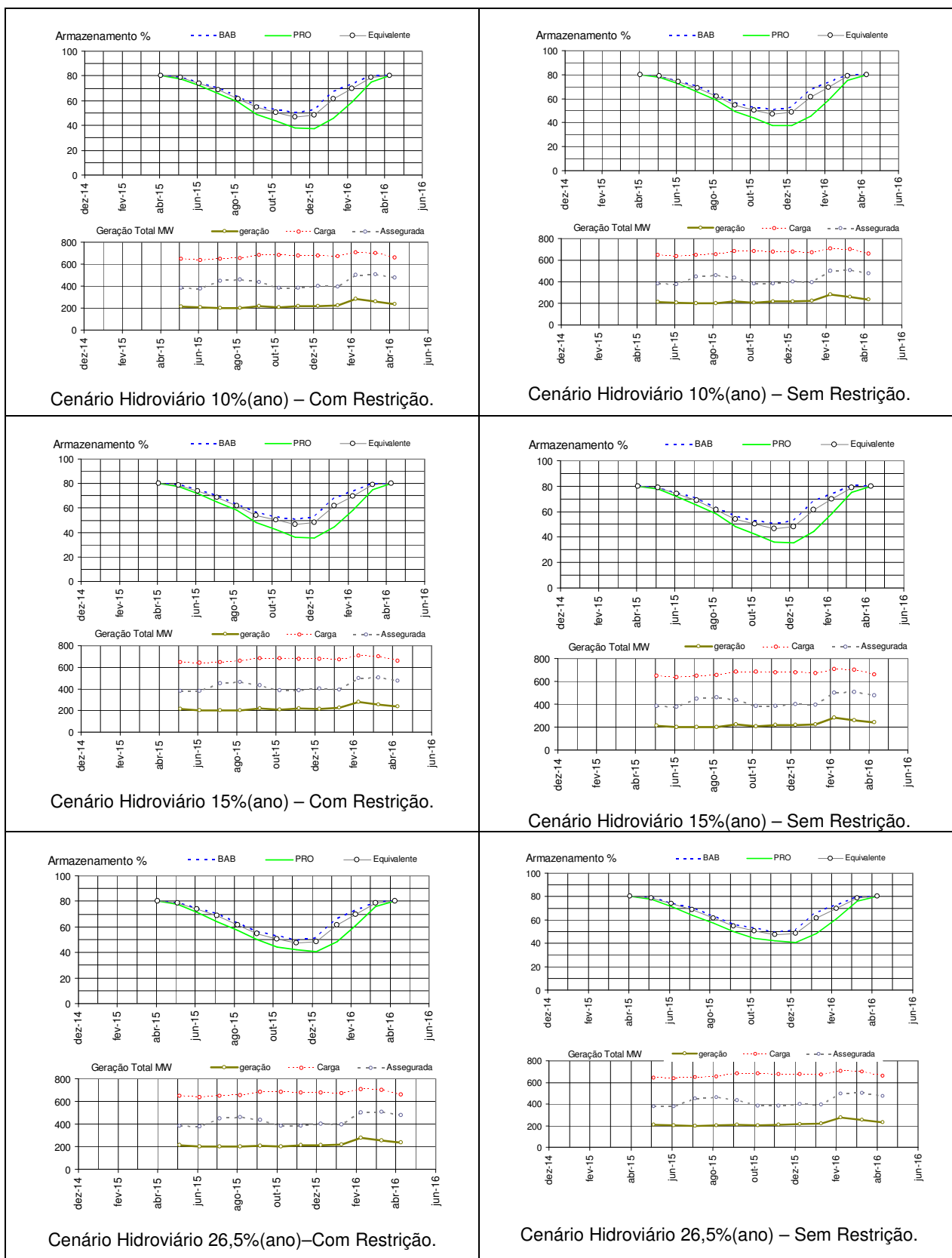


FIGURA 6.8 - Cenário Hidrológico “Muito Seco” (5° Percentil - 58% MLT) – 2015/2016

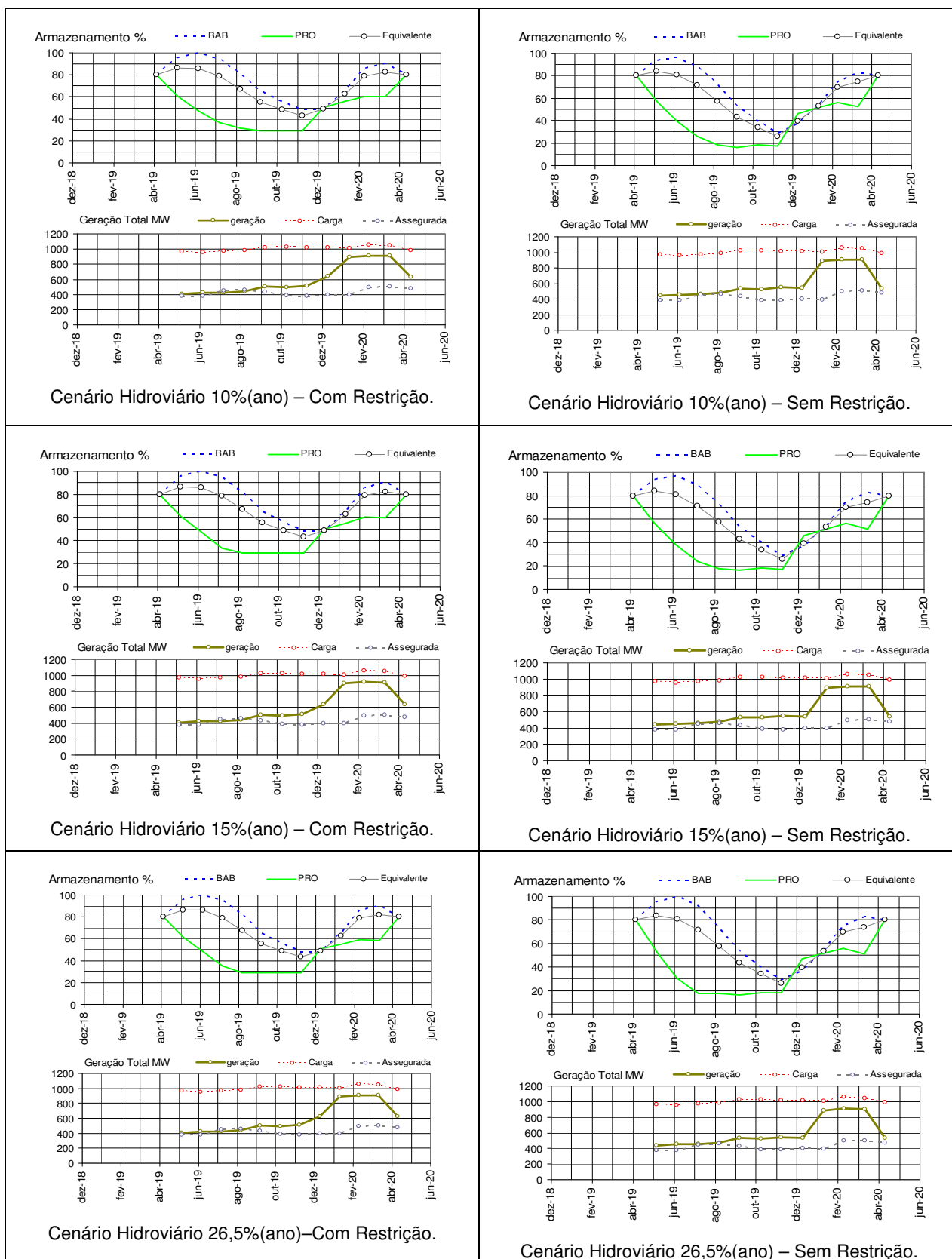


FIGURA 6.9 - Cenário Hidrológico “Úmido” (3º Quartil -118% MLT) – 2019/2020

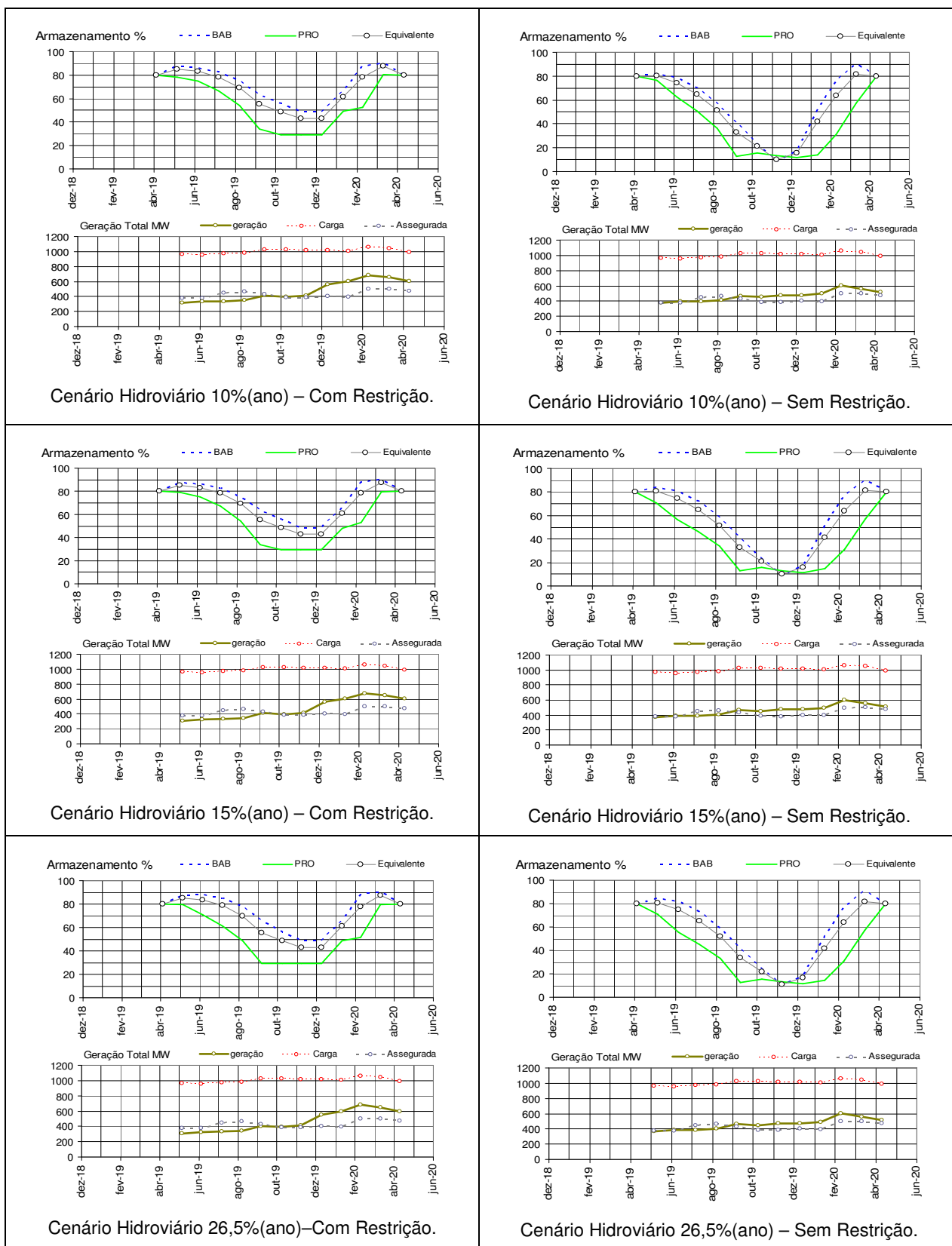


FIGURA 6.10 - Cenário Hidrológico “Normal” (Mediana -93% MLT) – 2019/2020

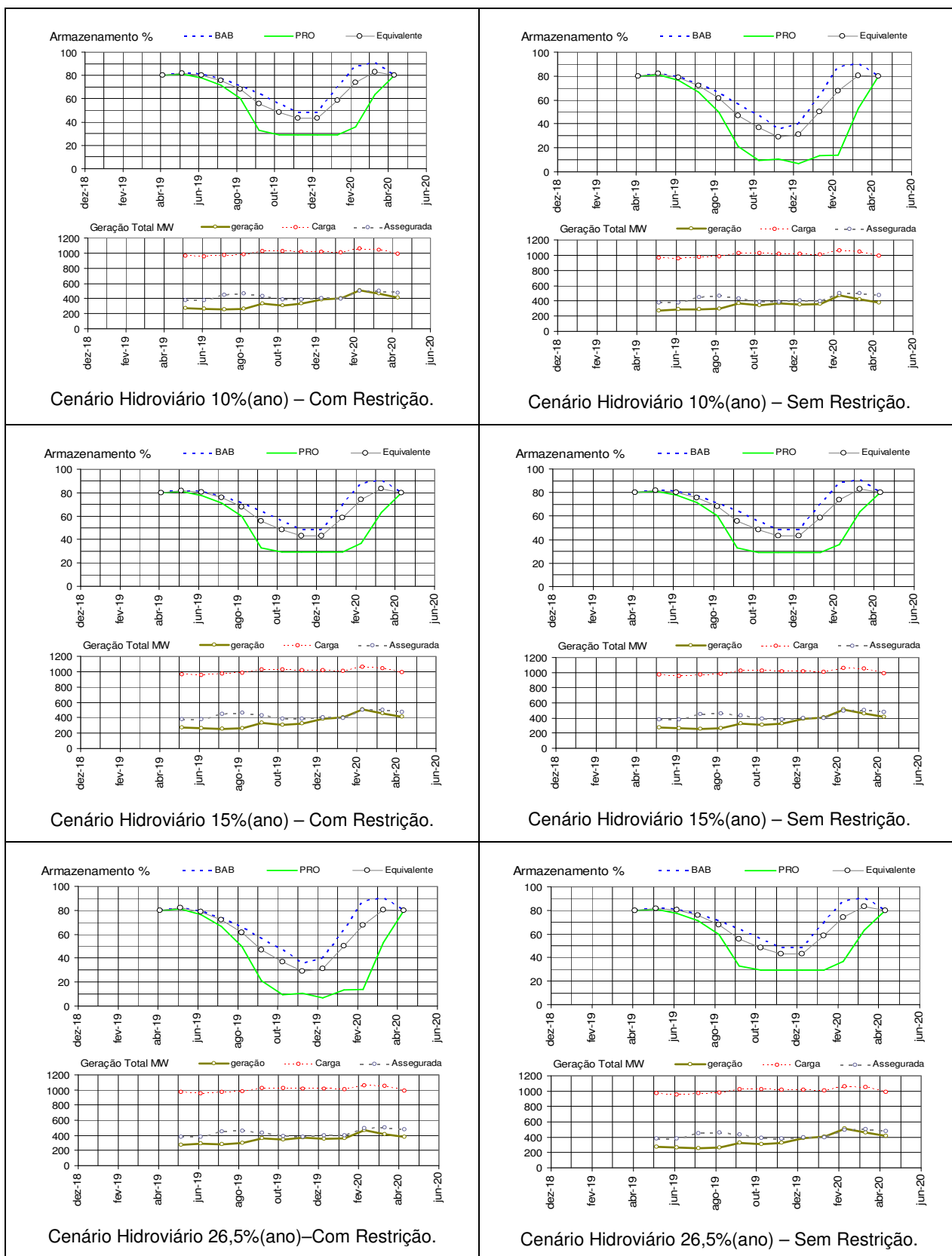


FIGURA 6.11 - Cenário Hidrológico “Seco” (Mediana -73% MLT) – 2019/2020

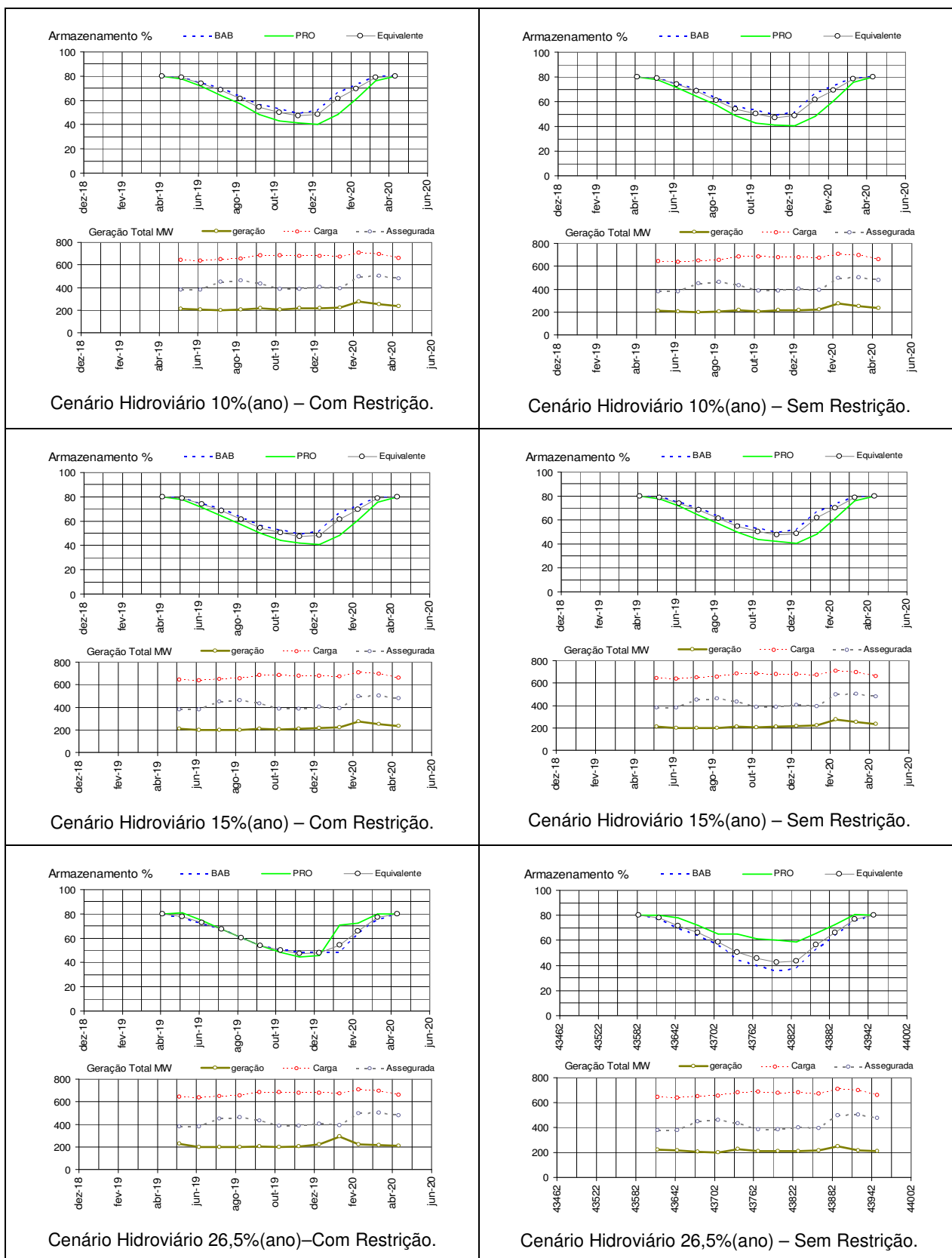


FIGURA 612 - Cenário Hidrológico “Muito Seco” (5° Percentil - 58% MLT) – 2019/2020

A simulação de cenários “sem restrições” de níveis operacionais permitiu ao modelo uma ampliação do universo de busca pela solução ótima. Nesta condição de liberdade operacional, o modelo sempre buscará a trajetória ótima de produção energética, explorando todos os recursos disponíveis, incluindo o deplecionamento do reservatório até o limite mínimo estabelecido pela restrição de volume (mínimo útil operacional) das usinas reservatórios (Barra Bonita e Promissão).

A principal consequência observada para a navegação em decorrência do rompimento das restrições de nível mínimo operacional para navegação é a ocorrência de intervalos de impedimento da navegação por calado mínimo. A situação de interrupção do tráfego hidroviário foi inevitável para os trechos localizados a montante da EC Promissão e Barra Bonita. Também foi observadas restrições por nível a jusante da EC de Ibatinga.

A tabela 6.4 apresenta o mapeamento dos intervalos de impedimento do tráfego hidroviário para horizonte 2011/2012, associado às condições hidrológicas e a taxas de demanda de crescimento do tráfego hidroviário. Estes cenários só devem ocorrer em situações emergenciais de contingência energética. Em situação normal, a navegação tem prioridade sobre a geração.

Os impactos para navegação são maiores para os períodos de restrição hídrica. Para o período muito seco, devido à própria escassez hídrica, o modelo perde eficiência no processo de otimização, o que resulta em uma situação de operação fio d' água. Esta situação é favorável a navegação, com exceção, para o cenário de crescimento de 26,5% ao ano.

A tabela 6.5 apresenta o mapeamento das restrições encontradas para navegação para o período de 2015/2016 para as mesmas condições de crescimento e situação hidrológica. Os resultados apesar do horizonte de 03 anos à frente apresentam resultados similares aos observados para 2011/12. Da mesma forma os resultados obtidos para o horizonte de 2019/2020, apresentados na tabela 6.6, mantém a mesma tendência de comportamento.

TABELA 6.4 - Período de restrição ao tráfego hidroviário – 2011/2012.

Reservatórios	Hidrovia Tax. (%)	Cenário Hidrológico	2011/2012											
			Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Barra Bonita	10%	Úmido						X	X	X				
Ibitinga							X	X	X	X				
Promissão								X	X	X				
Barra Bonita	15%	Úmido						X	X	X				
Ibitinga						X	X	X	X	X				
Promissão					X	X	X	X	X					
Barra Bonita	26,50%	Úmido						X	X	X				
Ibitinga					X	X	X	X	X					
Promissão					X	X	X	X	X					
Barra Bonita	10%	Normal					X	X	X	X	X			
Ibitinga							X	X	X	X	X	X		
Promissão						X	X	X	X	X	X			
Barra Bonita	15%	Normal					X	X	X	X	X			
Ibitinga							X	X	X	X	X	X		
Promissão						X	X	X	X	X	X			
Barra Bonita	26,50%	Normal					X	X	X	X	X			
Ibitinga							X	X	X	X	X	X		
Promissão						X	X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	10%	Seco						X	X	X				
Ibitinga								X	X	X	X	X	X	
Promissão							X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	15%	Seco						X	X	X				
Ibitinga								X	X	X	X	X	X	
Promissão							X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	26,50%	Seco						X	X	X				
Ibitinga								X	X	X	X	X	X	
Promissão							X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	26,50%	Muito Seco					X	X	X	X				

TABELA 6.5 - Período de restrição ao tráfego hidroviário – 2015/2016.

Reservatórios	Hidrovia Tax. (%)	Cenário Hidrológico	2015/2016											
			Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Barra Bonita	10%	Úmido						X	X	X				
Ibitinga						X	X	X	X					
Promissão					X	X	X	X	X					
Barra Bonita	15%	Úmido						X	X	X				
Ibitinga					X	X	X	X	X					
Promissão				X	X	X	X	X	X					
Barra Bonita	26,50%	Úmido						X	X	X				
Ibitinga					X	X	X	X	X					
Promissão					X	X	X	X	X					
Barra Bonita	10%	Normal					X	X	X	X	X			
Ibitinga							X	X	X	X	X	X		
Promissão						X	X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	15%	Normal					X	X	X	X	X			
Ibitinga							X	X	X	X	X	X		
Promissão						X	X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	26,50%	Normal					X	X	X	X	X			
Ibitinga							X	X	X	X	X	X		
Promissão						X	X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	10%	Seco						X	X	X				
Ibitinga								X	X	X	X	X	X	
Promissão							X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	15%	Seco						X	X	X				
Ibitinga								X	X	X	X	X	X	
Promissão							X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	26,50%	Seco						X	X	X				
Ibitinga								X	X	X	X	X	X	
Promissão							X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	26,50%	Muito Seco					X	X	X	X				

TABELA 6.6 - Período de restrição ao tráfego hidroviário – 2019/2020.

Reservatórios	Hidrovia Tax. (%)	Cenário Hidrológico	2019								2020			
			Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Barra Bonita	10%	Úmido						X	X	X				
Ibitinga						X	X	X	X					
Promissão					X	X	X	X	X					
Barra Bonita	15%	Úmido						X	X	X				
Ibitinga						X	X	X	X					
Promissão					X	X	X	X	X					
Barra Bonita	26,50%	Úmido						X	X	X				
Ibitinga						X	X	X	X					
Promissão				X	X	X	X	X	X					
Barra Bonita	10%	Normal					X	X	X	X	X			
Ibitinga							X	X	X	X	X	X		
Promissão						X	X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	15%	Normal					X	X	X	X	X	X		
Ibitinga							X	X	X	X	X	X		
Promissão						X	X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	26,50%	Normal					X	X	X	X	X	X		
Ibitinga							X	X	X	X	X	X		
Promissão						X	X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	10%	Seco						X	X	X				
Ibitinga								X	X	X	X	X	X	
Promissão							X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	15%	Seco						X	X	X				
Ibitinga								X	X	X	X	X	X	
Promissão							X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	26,50%	Seco						X	X	X				
Ibitinga								X	X	X	X	X	X	
Promissão							X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	26,50%	Muito Seco					X	X	X	X				

7. Análise dos Resultados.

Os resultados obtidos com o modelo solver AES foi apresentado no capítulo anterior. O objetivo deste capítulo é promover uma análise crítica sobre os resultados gerados pelo modelo, bem como, os possíveis impactos para os segmentos de geração e navegação.

Um dos objetivos secundários deste trabalho é avaliar o comportamento dos setores de navegação e geração em relação a cenários hidrológicos variados. Para possibilitar análise independente, foi gerado gráfico (figura 7.1.), com os resultados dos *patamares médios de geração* em comparação com o potencial de geração pela energia assegurada para a cascata, para cada cenário hidrológico: úmido, normal, seco e muito seco.

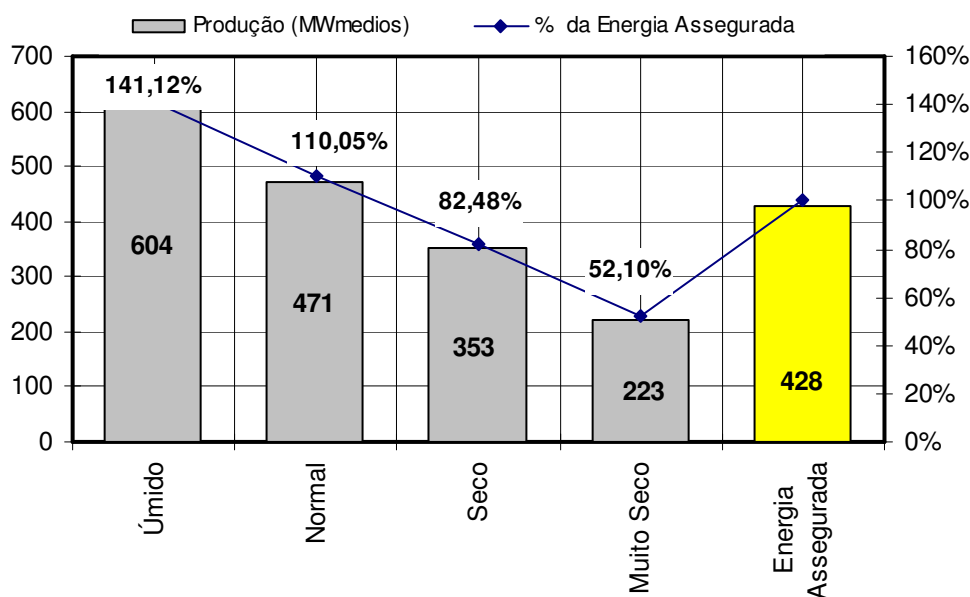


FIGURA 7.1 – Produção Tietê versus Cenários Hidrológicos.

Na seqüência foram preparados gráficos estratificados (figuras 7.2 a 7.5), com a representação da produção em MW médios obtidos para cada cenário hidrológico versus taxa de crescimento para os horizontes (2011/2012, 2015/16 e 2019/20). As taxas de crescimento foram representadas por curvas independentes, desta forma é possível avaliar a participação de cada variável no contexto do problema.

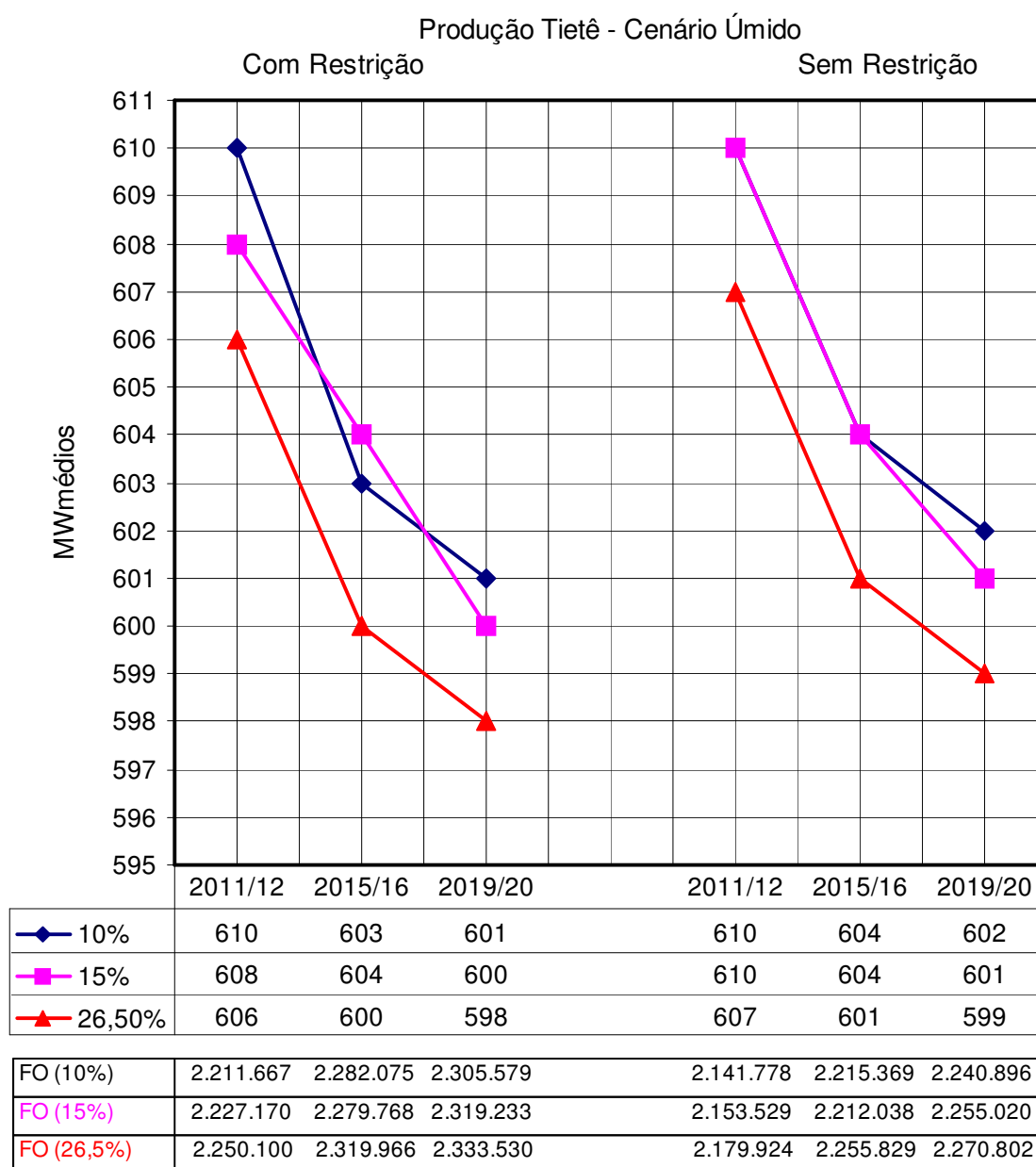


FIGURA 7.2 – Produção Tietê – Cenário Úmido.

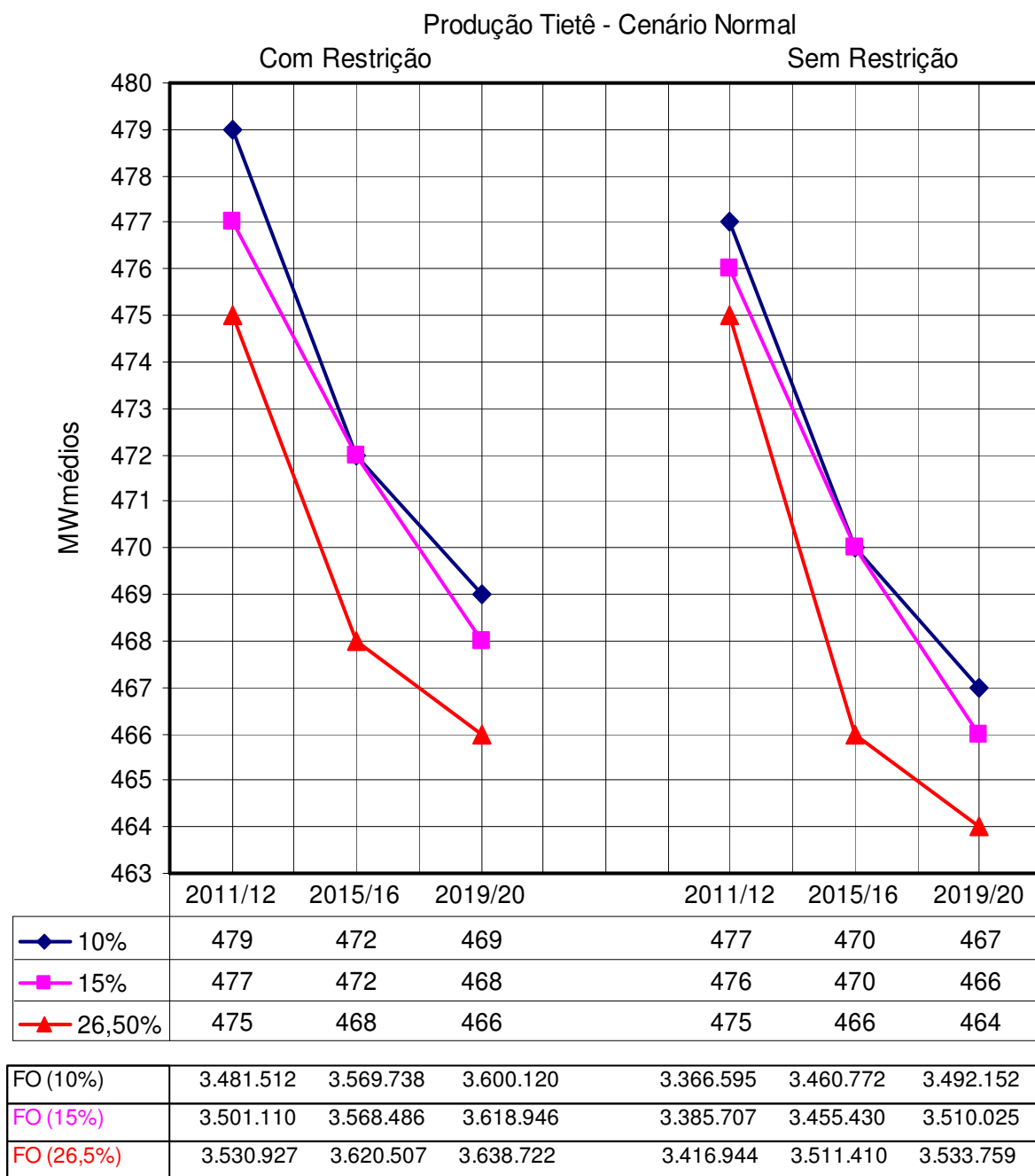


FIGURA 7.3 – Produção Tietê – Cenário Normal.

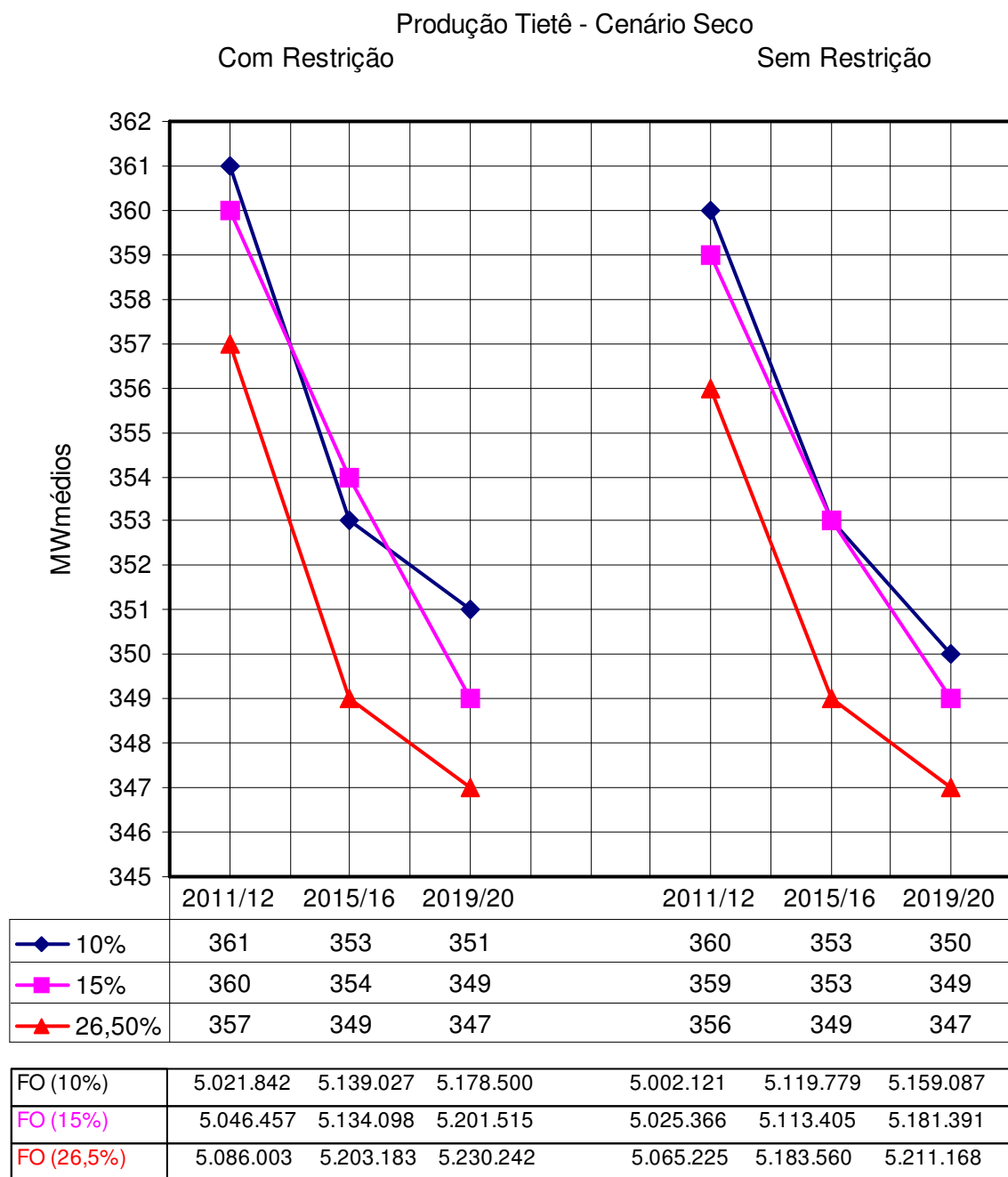


FIGURA 7.4 – Produção Tietê – Cenário Seco.

Produção Tietê - Cenário Muito Seco
Com RestriçãoSem Restrição

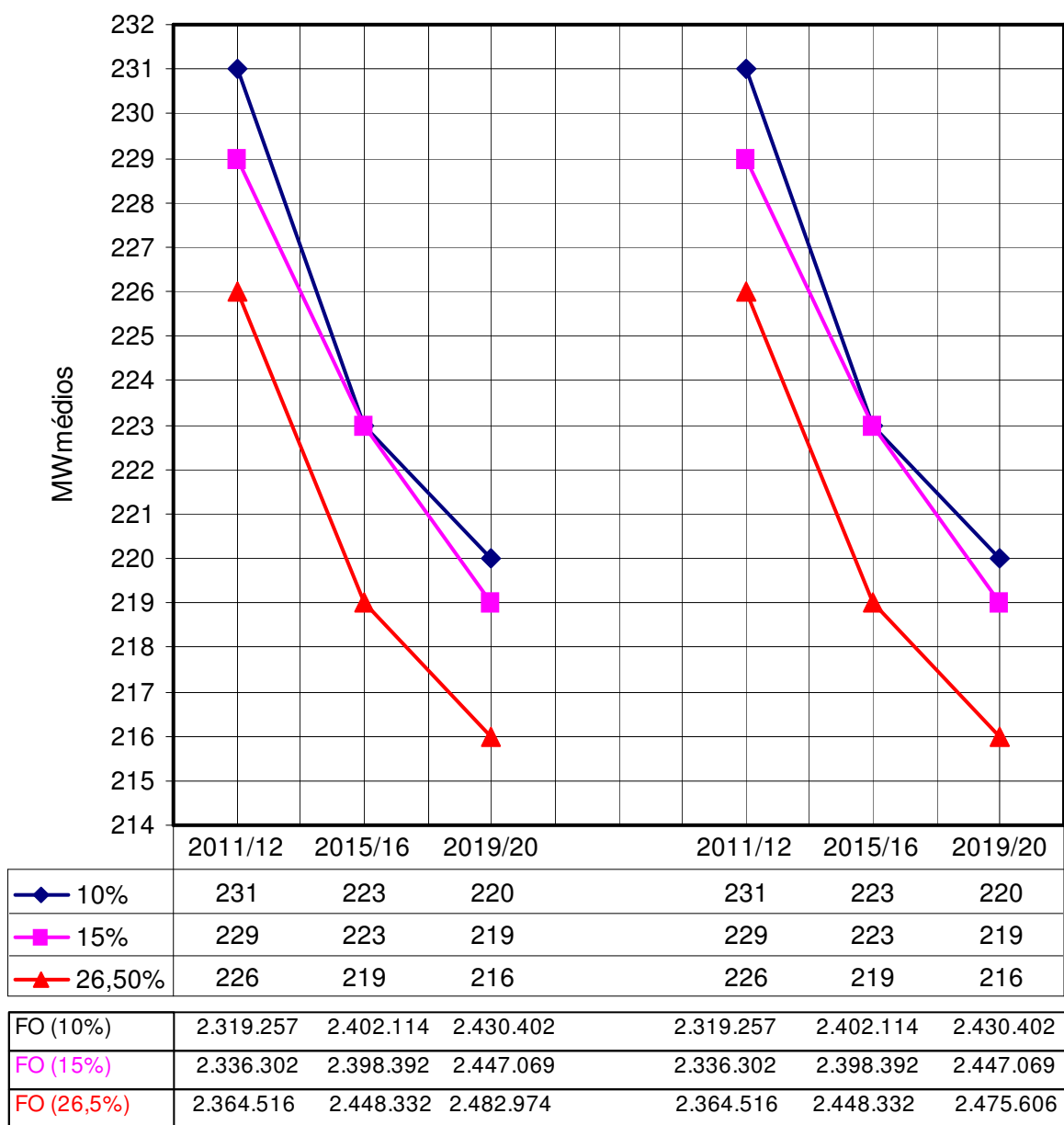


FIGURA 7.5 – Produção Tietê – Cenário Muito Seco.

Os resultados obtidos pelo modelo ratificam o impacto da variável hidrológica sobre o segmento de geração. Para a navegação os cenários hidrológicos passam a ser impactantes após a liberação das restrições de níveis operacionais para navegação. Caso contrário o modelo mantém a regularização dos níveis operacionais para navegação em detrimento a geração energética.

A figura 7.1 apresenta o desempenho da produção energética em MW médios (mensais), obtidos pelo modelo para os quatro cenários hidrológicos estudados. Para o cenário úmido o patamar de geração média mensal otimizada pelo modelo foi 604 MW médios. Esta produção representa uma geração 41% acima do valor previsto para a energia assegurada da cascata do rio Tietê. Para o cenário normal, o modelo apresentou uma geração média mensal otimizada de 471 MW médios, ou seja, 10% acima da energia assegurada. O resultado obtido com o modelo é bastante significativo em termos de ganho para produção energética, quando consideramos que é o cenário com maior probabilidade de ocorrência.

A simulação dos cenários com baixa disponibilidade hídrica: “seco” e “muito seco”, resultaram em uma produção média abaixo do prevista para a energia assegurada. Para o cenário seco o patamar de geração média foi de 353 MW médios (18%) abaixo do valor da energia assegurada e de 223 MW médios (48%) abaixo da energia assegurada para o cenário muito seco. O modelo teve melhor desempenho para os cenários de disponibilidade hídrica (úmido e normal), dado o grau de liberdade para busca da eficiência ótima. Para os cenários de escassez hídrica o modelo não teve possibilidades de atender integralmente a demanda.

Foram simulados cenários alternativos, prevendo-se uma possível priorização da geração em detrimento a navegação como resultado de um cenário de escassez energética. Neste caso as restrições de nível mínimo para navegação dos reservatórios das UHEs Barra Bonita e Promissão foram liberadas para aproveitamento energético desta parcela do volume útil. Para o reservatório da UHE Barra Bonita o nível mínimo para navegação (446,50) representa um volume útil armazenado de 47,81%. Para a UHE Promissão, o nível mínimo para navegação (381,00), representa um volume de 28,72% do volume útil.

Os resultados das simulações para os cenários “com” e “sem” restrição de nível para navegação, revelaram aspectos interessantes sobre o montante total de produção energética. A utilização da parcela do volume útil abaixo do nível mínimo de navegação, não resultou em aumento significativo da produção energética total, quando comparado com os resultados obtidos para o cenário sem restrição. Este fato pode ser explicado, pelo efeito causado pela produtividade. O efeito “nível”, acabou “compensando” os benefícios de um maior grau de liberdade do modelo para otimizar. Outro aspecto importante que não deve deixar de ser considerado nesta situação é o desempenho da curva de trajetória de produção ao longo do período. A análise das curvas e dos índices da FO mostrou melhores resultados para a operação sem restrição. As curvas de trajetória atenderam melhor a curva de demanda. Esta situação poderia representar na prática melhores resultados financeiros. A curva de produção melhor distribuída, acompanhando a curva de demanda teria melhores oportunidades de explorar os benefícios de preço do mercado de energia.

Para o segmento da navegação, a manutenção das restrições operacionais passa a ser requisito fundamental para continuidade da operação da hidrovia. A liberação das restrições operativas implica na interrupção da navegação nos trechos localizados principalmente a montante dos reservatórios das usinas de Barra Bonita e Promissão. O período de interrupção da navegação aumenta com a redução da disponibilidade hídrica, conforme tabela resumo 7.1.

O objetivo principal deste estudo é a avaliação dos possíveis impactos na produção energética da cascata, como resultado do crescimento da demanda hidrovária. Os resultados obtidos pelo modelo, independentemente da situação hidrológica, indicaram em termos de consumo energético para o sistema hidrovário, uma retirada energética da cascata do rio Tietê de 7,0 MW para 2015 e 10 MW médios para 2020. Este montante relaciona-se com a retirada de água para o processo de eclusagem. Este consumo energético apresenta-se proporcionalmente maior na primeira metade da década em decorrência da saturação da capacidade efetiva observada para a maioria das eclusas após 2015. Este efeito implica em uma estabilização do número de operações de eclusagens e conseqüentemente das vazões equivalentes utilizadas para o processo de eclusagem. Os gráficos da figuras 7.6

ilustram as perdas energéticas (MW médios mensais) acumuladas para cada situação hidrológica.

TABELA 7.1 – Tabela resumo das interrupções de tráfego hidroviário.

Reservatórios	Tempo Indisponível	Cenário Hidrológico	Período Hidrológico											
			Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Barra Bonita	03 meses	Úmido						X	X	X				
Ibitinga	04 meses					X	X	X	X					
Promissão	05 meses				X	X	X	X	X					
Barra Bonita	05 meses	Normal					X	X	X	X	X			
Ibitinga	06 meses						X	X	X	X	X	X		
Promissão	07 meses					X	X	X	X	X	X	X		
Barra Bonita	03 meses	Seco						X	X	X				
Ibitinga	06 meses							X	X	X	X	X	X	
Promissão	06 meses						X	X	X	X	X	X		

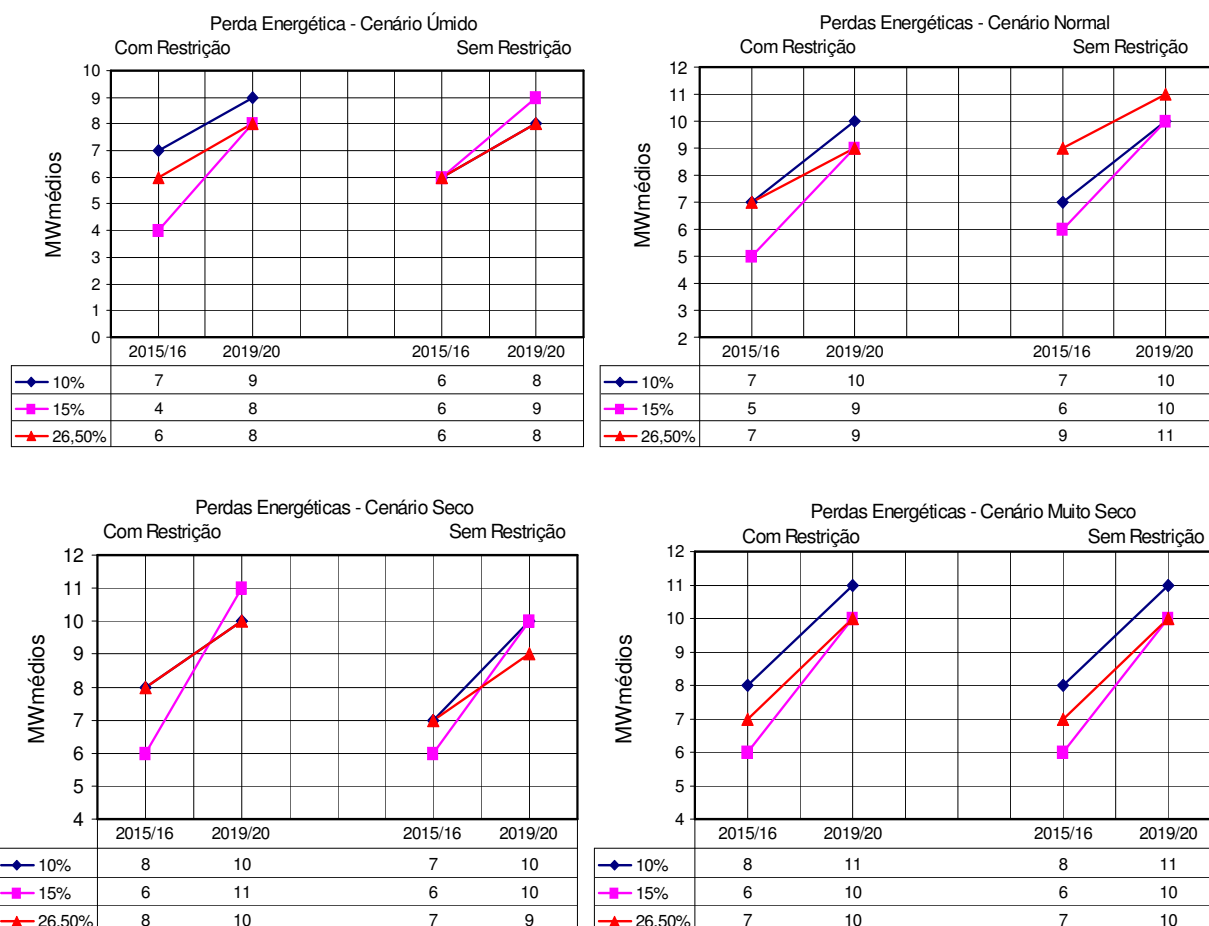


FIGURA 7.6 – Consumo energético do sistema hidroviário.

8. Conclusões

A utilização de modelos que incorporam ferramentas integradas de otimização e simulação, possibilitam uma maior interação com o usuário, despertando interesse pela utilização de ferramentas racionais para auxílio à tomada de decisão em processos de planejamentos hidroenergéticos.

A escolha de um aplicativo de grande utilização no mercado teve como objetivo facilitar a disseminação do modelo no meio profissional e acadêmico, além de outras facilidades estratégicas como atualizações e manutenções.

Como aspecto negativo, destaca-se a restrição da aplicação em problemas mais complexos que necessitam um maior número de variáveis. Neste caso será necessária a aquisição de pacotes adicionais de softwares que potencializam a capacidade do aplicativo. Para pequenos problemas a aplicação da planilha eletrônica na modelagem se mostrou adequada e eficiente.

A escolha do trecho da cascata do rio Tietê para desenvolvimento dos estudos foi motivada por fatores estratégicos. Além de estar inserida no tramo de maior movimentação da hidrovía Tietê-Paraná, com cerca de 80% de toda carga transportada, possui uma das melhores infra-estruturas de tráfego, histórico operacional e esta inserida numa região estratégica, que concentra 50% de todo PIB brasileiro, além do potencial de crescimento.

Os resultados obtidos com o modelo foram analisados objetivando avaliar os efeitos de cada variável sobre os setores de geração e navegação. De todas as variáveis, a hidrologia foi à variável decisiva na determinação dos patamares médios de

geração para cascata. O modelo apresentou resultado satisfatório para os diversos cenários hidrológicos. “Destacam-se os resultados obtidos para os cenários considerados “úmidos” e normais”, com produção acima da previsão da energia assegurada. Para o cenário normal, de maior probabilidade de ocorrência, os resultados obtidos na produção média foram 10% acima do previsto para a energia assegurada. Para os cenários de escassez hídrica (“seco” e “muito seco”), o modelo conseguiu atender parcialmente a meta de produção acima da energia assegurada (cenário “seco”). Para o cenário “muito seco”, de extrema severidade quanto à disponibilidade hídrica foi insuficiente para possibilitar atuação do modelo.

A navegação também foi influenciada pelos cenários hidrológicos. Para os cenários com manutenção dos níveis mínimos operacionais para a navegação, o modelo garantiu o atendimento da navegação em detrimento da geração. Neste caso os reservatórios atuaram na regularização dos níveis para navegação.

Em cenários alternativos de retirada da restrição de nível mínimo para navegação, com objetivo de atender a uma possível contingência energética, foi observada uma penalização da navegação, através de intervalos de impedimento de tráfego em decorrência de calado mínimo. A diferença da produção energética média mensal, para os dois cenários: “com” e “sem” restrições de nível mínimo para navegação foram muito pequenas. Esta situação pode ser explicada pelo efeito da produtibilidade, em decorrência da manutenção de níveis mais altos nos reservatórios.

Os ganhos de produção obtidos pela maior produtibilidade “compensaram” os ganhos de otimização obtidos pelo modelo para os cenários sem restrição de nível mínimo. Analisando o desempenho das curvas de geração para os dois cenários ao longo do tempo, observa-se melhor desempenho para o cenário sem restrição de nível. A trajetória da curva de geração se mostrou mais aderente ao atendimento da curva de demanda ao longo do período de simulação. Esta situação reflete um melhor benefício econômico, como consequência de um melhor aproveitamento da sazonalidade e da variação do preço da energia.

As simulações com objetivo de avaliar os impactos energéticos produzidos na cascata do rio Tietê em decorrência do aumento do tráfego hidroviário resultaram em

uma retirada energética média mensal de 7 MW para o horizonte de 2015 e 10 MW médios para 2020. O menor valor acumulado de crescimento para o período de 2015 a 2020, comparativamente com a primeira metade da década é reflexo da saturação da capacidade efetiva das eclusas, já observadas para o período de 2015 a 2017, resultando na limitação da quantidade de operações.

Além da escolha dos cenários de simulação, outros fatores devem ser cuidadosamente avaliados no processo de modelagem. A condição inicial e final dos níveis dos reservatórios de acumulação pode ser decisiva para o desempenho do modelo. Neste estudo adotou-se uma condição inicial de partida de 80% de armazenamento no volume dos reservatórios das UHE Barra Bonita e Promissão. A meta para o final do período era retornar para condição inicial de volume. O modelo foi desenvolvido para um horizonte anual, com discretização mensal de resultados.

Por motivos estratégicos e de confidencialidade, foi utilizado fator de disponibilidade para geração de 0,86. Este valor referencial foi obtido em consulta ao banco de informações estatísticas para o segmento de geração hidráulica da NERC. Historicamente o setor elétrico brasileiro tem apresentado níveis superiores de disponibilidade.

A função objetivo de minimização da complementação de energia se mostrou adequada para o propósito do estudo. As curvas de produção mantiveram trajetórias estáveis durante todo período. A meta de produção acima da curva da energia assegurada foi alcançada na maioria dos cenários simulados. A exceção para os cenários com severa escassez hídrica.

O estudo do perfil histórico-operacional da hidrovía Tietê-Paraná permitiu avaliar o cenário atual, identificando diversas ações positivas, como o potencial de crescimento, a política governamental para investimento nos setores de transporte, agroindústria e combustíveis. Foram relevantes as ações operacionais implantadas na via nos últimos anos. O aumento de calado, a liberação de comboios duplos, obras para eliminação de restrições na via, como dragagens, aumento de vãos de ponte, etc, possibilitaram um grande crescimento da movimentação de carga, sem aumento da capacidade de carga da frota atuante na hidrovía.

Outros aspectos despertam atenção. O estudo de previsão de demanda e capacidade efetiva das eclusas revelou uma potencial saturação da capacidade efetiva de operação das eclusas para os próximos anos, dependendo das taxas de crescimento de demanda que se verifique. Esta situação está motivada por uma série de fatores inerentes à realidade observada hoje na via. A predominância de fluxo de carga unidirecional resulta em um baixo aproveitamento da capacidade das eclusas. Outras situações, como a baixa capacidade de carga da frota operante na hidrovia, embarcações inadequadas para alguns segmentos (areia e cana de açúcar), também resultam em uma baixa eficiência operacional.

A utilização da via para demandas regionais de transporte (cana de açúcar em Bariri e areia em Barra-Bonita) contribuem sensivelmente na contabilização de desempenho destas eclusas. Poderíamos citar também a exploração turística em Barra-Bonita, como outro elemento que impacta o desempenho e rendimento da instalação quanto à limitação de sua capacidade efetiva.

Investimentos no setor hidroviário com objetivo de melhorar a eficiência operacional das eclusas e principalmente na otimização do recurso hídrico resultaria em benefícios econômicos para ambos os segmentos (geração e navegação).

Algumas ações poderiam resultar em significativa melhoria do desempenho das instalações e conseqüente aumento da capacidade efetiva operacional. A instalação de garagens de barco para diminuir o tempo de entrada e saída das embarcações nas câmaras das eclusas seria um bom exemplo de obra para ampliação da capacidade efetiva das eclusas. Outras ações também contribuiriam como a modernização e ampliação da capacidade de carga da frota operante na hidrovia, fomento no transporte de cargas bidirecionais, investimento em infra-estrutura portuária e integração com demais modais de transporte.

Estas ações serão inevitavelmente implantadas, ou por ações de planejamento ou por necessidades mercadológicas.

Vale destacar que todos os resultados e comparações foram realizados entre cenários ótimos, gerados pelo modelo de otimização e simulação. Para cada cenário e variáveis, o modelo indicava a situação ótima possível.

Apesar de este trabalho concentrar-se na área de recursos hídricos, energéticos e ambientais, foi necessária uma grande integração com outras áreas, principalmente a área de transportes.

Como sugestão de pesquisas futuras correlacionadas ao tema pode-se indicar:

- a) Ampliação dos estudos de uso múltiplos com incorporação de modelos de análise do comportamento de tráfego;
- b) Avaliação e simulação dos impactos para os setores de navegação e geração com a implantação de obras especiais nas vias (garagem de barcos, eclusas adicionais, aprofundamento de canais, etc);
- c) Desenvolvimento de novos modelos de otimização de curto prazo, com horizontes menores (< Mensal);
- d) Ampliação dos estudos, avaliando impactos para toda hidrovia Tietê-Paraná.
- e) Avaliação e comparação com outras funções objetivo;
- f) Estudo dos efeitos e impactos do transporte de sedimentos para os setores (Resolução ANA agosto/2010 – trata sobre monitoramentos nos reservatórios).

A expectativa é que este trabalho possa ter contribuído ou despertado interesse sobre o assunto. A navegação e a produção de energia hidroelétrica são patrimônios estratégicos que podem contribuir para o desenvolvimento, eficiência e competitividade de um país perante a economia globalizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas – “A Navegação de Interior e suas Interfaces com o Setor de Recursos Hídricos – Aproveitamento do Potencial Hidráulico para Geração de Energia no Brasil” Caderno de Recursos Hídricos 3. Brasília: ANA, 2007. 168p.

Agência Nacional de Energia Elétrica – “Atlas de Energia Elétrica no Brasil” 3.ed. Brasília: ANEEL, 2008. 236p.

Agência Nacional de Energia Elétrica – “Caderno Temático 3 - Energia Assegurada”. Brasília: ANEEL, 2005. 18p.

Agência Nacional de Transporte Aquaviário. “Panorama Aquaviário” Volume 3. Brasília: ANTAQ, 2009. 97p.

AHRAMA, CODOMAR, DNIT, “A Hidrovia do Rio Paraná – Dados e Informações”. São Paulo: AHRAMA, 2009. 55p.

AHRAMA, DNIT, “Normas de Tráfego na Hidrovia Tietê-Paraná e seus Canais – 3ª. Ed. São Paulo: AHRAMA, 2005. 55p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. “NBR 6023: Informação e documentação – Referências – Elaboração”, Rio de Janeiro: ABNT, ago. 2002.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. “NBR 10520: Informação e documentação – Citações em documentos – Apresentação”, Rio de Janeiro: ABNT, ago. 2002.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. “NBR 14720: Informação e Documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação”. Rio de Janeiro: ABNT, jul. 2001.

Braga, B., Barbosa, P. S. F., Barros, M. T. L., "SISCOM: Sistema Computadorizado de Apoio ao Planejamento e Operação de Sistemas Hidroenergéticos", RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 03, n°. 04 Out/Dez 1998, 89-111.

Braga, B., Barbosa, P. S. F., Nakayama, P. T., "Sistema de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos", RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 03, Jul/Set 1998, 73-95.

Brandão, J. L. B., "Modelo para Operação de Sistemas de Reservatórios com usos Múltiplos", Tese de Doutorado - USP: São Paulo, 2004, 160p.

Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, "Agentes de Geração - Treinamento", São Paulo: CCEE, SET2008. 285p.

CBDB, "Guia Básico de Segurança de Barragens". São Paulo: Núcleo regional de São Paulo, 1999. 77p.

CESP, "Estudo para Implantação de Navegação nos Rios Paraná e Tietê", São Paulo, 1985, 261p.

CESP, "Estudo para Implantação de Navegação nos Rios Paraná e Tietê", Vol. II, São Paulo, 1985, 261p.

Directorate General for Energy and Transport, "Energy and Transport in Figures 2010" Brussels: European Union. 2010. 98p.

Directorate General for Energy and Transport, "Inland Waterway Transport Funding" Brussels: European Union. 2008. 147p.

ESCAP., "Training of Trainers Manual for Inland Water Transport", New York: UNITED NATIONS, 1997. 217p.

- Economic Commission for Europe., “Inventory of Main Standards and Parameters of The e Waterway Network (“BLUE BOOK”)", Geneva: UNITED NATIONS, 2002. 73p.
- ECMT, “What Markets are there for Transport by Inland Waterways”, Paris: European Conference of Ministers of Transport. 1999. 227p.
- ECMT, “Strengthening Inland Waterway Transport – Pan-European co-operation for Progress”, Paris: European Conference of Ministers of Transport. 2006. 137p.
- EUROESTAT, “Energy, Transport and Environment Indicators”, Luxemburgo: European Union, 2009. 184p.
- EUROESTAT, “Eurostatistics – Data for Short-Term Economic Analysis”, Luxemburgo: European Union, 2010. 89p.
- EUROESTAT, “Eurostat Yearbook“, Disponível em: <<http://epp.eurostat.ec.europa.eu> >. Acesso em: 15. mar. 2010.
- EUROESTAT, “Panorama of Transport and Environment Indicators”, Luxemburgo: European Union, 2009. 194p.
- Francato. A. L., “Contribuição ao Estudo das Propriedades Ótimas da Operação de Sistemas Hidroelétricos”, Dissertação de Mestrado – UNICAMP-SP. 1997. 212p.
- Francato, A. L., Franco, P. S. B., “Produção de Energia Hidroelétrica”, Aula 02 IC477, Campinas: FEC, 2008. 18p.
- Franco, H.T., “Modelo de Suporte à Decisão para a Otimização da Operação de Sistema de Usinas Hidroelétricas”, Tese de Mestrado UNICAMP: Campinas - SP, 2006, 150p.

- Fernandes, M. B., “As Eclusas no Ambiente da Navegação no Brasil”, Trabalho de Graduação Interdisciplinar, São Paulo: MACKENZI, 2001. 95p.
- Inland Navigation Europe. “A Changing World”, Brussels: INE, 200?. 9p.
- Inland Navigation Europe., “Freight Transport Embarking On a New Course”, Brussels: INE, 200?. 12p.
- Inland Navigation Europe, “Just Add Water”, Brussels: INE, 2006. 9p.
- Inland Navigation Europe, “Water Transport – Facts and Figures”, Brussels: INE, 2006. 14p.
- IWAI, “Annual Report 2008-09”, Noida: Inland Waterways Authority of India, 2010. 76p.
- Labadie, J., “Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review ” Journal of Water Resources Planning and Management, 2004. 93-111p.
- Laboratório Central de Engenharia Civil, “Segurança de Barragens”, CESP: Ilha Solteira, 198?, 61p.
- Lee, S. Y., Hamlet, A. F., Fitzgerald, C. J., Burges, S. J., “Optimized Flood Control in the Columbia River Basin for a Global Warming Scenario”, Journal of Resources Planning and Management; Nov/Dez, 2009.
- Lopes, J. E. G., “OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS”: Dissertação de Mestrado - USP: São Paulo, 2001, 85p.
- Lopes, J. E. G., Santos, R. C. P., “Capacidade de Reservatórios”, PHD-5706 – Trabalho de Estruturas Hidráulicas, São Paulo: EPUSP, 2002. 64p.

- Lund, J.R., “Optimization Modelling in Water Resource Systems and Markets”, Zaragoza: EXPOZARAGOZA 2008;
- Ministério da Defesa, Ministério dos Transportes, “Plano Nacional de Logística e Transporte – PNLT, Relatório Executivo”, Rev 00. Brasília: CENTRAN, 2007, 497p.
- Ministério da Integração Nacional, “Manual de Segurança de Barragens”. Secretária da infra-estrutura Hídrica. Brasília: 2002, 150p.
- Ministério de Minas e Energia, “Balanço Energético Nacional – Resultados Preliminares – Ano Base 2009”, Rio de Janeiro: EPE, 2010, 54p.
- Ministério de Minas e Energia, “Balanço Energético Nacional – Resultados Preliminares – Ano Base 2009”, Rio de Janeiro: EPE, 2010, 54p.
- NOVAK., P. MOFFAT, A.I.B., NALLURI, C., NARAYANAN., “Hydraulic Structures” 2.ed. London: E&FN SPON, 1996, 599p.
- Núcleo Regional de São Paulo, “Guia Básico de Segurança de Barragens”, São Paulo: CBDB. 1999. 77p.
- ONS, “Glossário de termos técnicos – SubMódulo 20.1 – Procedimentos de Rede”. 17, jun. 2009. Disponível em: < <http://www.ons.org.br> >. Acesso em: 04 fev. 2010.
- ONS, “Histórico da Operação – Energia Natural Afluente”. Disponível em: < <http://www.ons.org.br> >. Acesso em: 06 fev. 2010.
- ONS, “Atualização de Séries Históricas de Vazões – Período 1931 a 2008”. Nov. 2009. Disponível em: < <http://www.ons.org.br> >. Acesso em: 04 set. 2010.

ONS, “Relação dos Sistemas e Modelos Computacionais – SubMódulo 18.2 – Procedimentos de Rede”. 05, ago. 2009. Disponível em: < <http://www.ons.org.br> >. Acesso em: 04 fev. 2010.

ONS, “Plano Anual de Prevenção de Cheias – Ciclo 2010/2011”. Ago. 2010. Disponível em: < <http://www.ons.org.br> >. Acesso em: 04 fev. 2010.

ONS, “O Operador Nacional do Sistema Elétrico e os Procedimentos de Rede: visão geral – SubMódulo 1.1 – Procedimentos de Rede”. 17, jun. 2009. Disponível em: < <http://www.ons.org.br> >. Acesso em: 04 fev. 2010.

Pereira, A.F. S., “Planejamento da Operação Energética e da Manutenção no Sistema Hidrotérmico de Potência Brasileiro” Dissertação de Mestrado – UNICAMP, Campinas-SP, 2006.

Ramos., M.V.R., “Capacidade de Tráfego de Eclusas”, Dissertação de Mestrado, São Paulo: USP, 1990, 123p.

SCHNITTER, N. J., "A History of DAMS – THE USEFUL PYRAMIDS", Rotterdam: A.A.Balkema, 1994. 226p.

SETTI, A. A., LIMA, J. E. F., CHAVES, A. G. M., PEREIRA, I. C., “Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos” 2. ed. Brasília: ANEEL, 2000. 207p.

Secretaria de Transportes Aquaviários, “Relatório Estatístico Hidroviário 1998/1999/2000”, Brasília: Ministério dos transportes. 2000.

Secretaria dos Transportes – “Boletim Estatístico da Secretaria dos Transportes do Estado de São Paulo 2005”, São Paulo: Governo do Estado de São Paulo. 2005. 113p.

Secretaria dos Transportes – “ Balanço “Anual 2008”, São Paulo: Governo do Estado de São Paulo. 2008. 289p.

Secretaria dos Transportes - Departamento Hidroviário, “Navegação nos Rios Tietê Paraná – Estudos de Viabilidade – Resumo Geral”, Governo do Estado de São Paulo, São Paulo: Brasconsult. Dez 1968. 50p.

Secretaria dos Transportes – “Os Transportes no Estado de São Paulo – Balanço Anual 2005”, São Paulo: Governo do Estado de São Paulo. 2005. 289p.

USCAE, “Inland Waterway Navigation – Value to the Nation”, USA: Institute from Water Resource, 2000. 4p. Site:WWW.Corpsresults.us.

UNECE, EUROSTAT, ITF, “Illustrated Glossary for Transport Statistics”, Genova: UNECE. 2009. 181p.

UNECE, “Statistical Data”. Disponível em: < <http://www.unece.org> >. Acesso em: 10 fev. 2010.

United Nation, “Main Transport Indicators in the UNECE region 2007”, UNECE. 2007. 2p.

U.S. ARMY, “Inland Waterway Navigation Value to the Nation”, <http://www.CorpsResults.us>. 2000. 4p.

WAPCOS, “Detailed Project Report for Development of Navigation in Kakinada – Puducherry Canal along with river Godavari and Krishna – Final Report”, Gurgaon: WAPCOS Limited. 2010. 36p.

Woodruff, M., "Waterway: Working for America, Arlington: National Waterways Foudations. 2008. 26p.