

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS

Ferramentas e Metodologia para Consolidação de Dados de Usinas Hidrelétricas Brasileiras

Por: Ieda Geriberto Hidalgo

Orientador: Prof. Dr. Secundino Soares Filho

Co-orientadores: Dr. João Eduardo Gonçalves Lopes

Dr. Marcelo Augusto Cicogna

Banca Examinadora

Prof. Dr. Adriano Alber de França Mendes Carneiro.....EESC / USP

Prof. Dr. Mario Thadeu Leme de Barros..... EP / USP

Prof. Dr. Paulo Sérgio Franco Barbosa.....FEC / UNICAMP

Prof. Dr. Takaaki Ohishi.....FEEC / UNICAMP

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
Elétrica e de Computação da Universidade
Estadual de Campinas, para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Energia Elétrica.

Campinas, 08/2009

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

H53f Hidalgo, Ieda Geriberto
 Ferramentas e metodologia para consolidação de
 dados de usinas hidrelétricas brasileiras / Ieda Geriberto
 Hidalgo. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

 Orientadores: Secundino Soares Filho, João Eduardo
 Gonçalves Lopes, Marcelo Augusto Cicogna.
 Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
 Computação.

 1. Usinas hidrelétricas. 2. Planejamento. 3.
 Processamento de dados. 4. Banco de dados. I. Soares
 Filho, Secundino. II. Lopes, João Eduardo Gonçalves.
 III. Cicogna, Marcelo Augusto. IV. Universidade
 Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica
 e de Computação. V. Título.

Título em Inglês: Tools and methodology for data consolidation from Brazilian
hydroelectric plants

Palavras-chave em Inglês: Hydroelectric power plants, Planning, Data processing,
Data bases

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Adriano Alber de França Mendes Carneiro, Mario Thadeu

Leme de Barros, Paulo Sérgio Franco Barbosa, Takaaki Ohishi

Data da defesa: 18/08/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

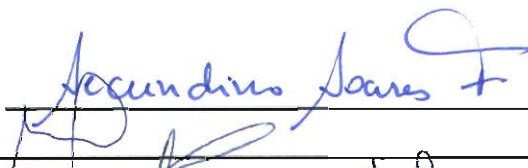
COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidata: Ieda Geriberto Hidalgo

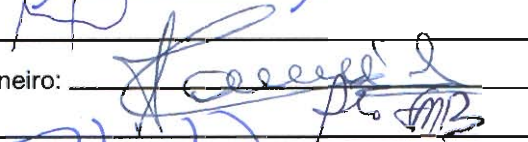
Data da Defesa: 18 de agosto de 2009

Título da Tese: "Ferramentas e Metodologia para Consolidação de Dados de Usinas Hidrelétricas Brasileiras"

Prof. Dr. Secundino Soares Filho (Presidente):



Prof. Dr. Mario Thadeu Leme Barros:



Prof. Dr. Adriano Alber de França Mendes Carneiro:



Prof. Dr. Paulo Sérgio Franco Barbosa:



Prof. Dr. Takaaki Ohishi:



Resumo

Este trabalho apresenta ferramentas e procedimentos para a consolidação de dados de usinas hidrelétricas brasileiras. O objetivo é melhorar a qualidade dos dados que servem como entrada aos modelos computacionais utilizados no planejamento e na programação da operação energética.

Como ferramentas de suporte à aplicação da metodologia, são descritos: o gerenciador de dados HydroData, o construtor de consultas HydroConsulta e o simulador da operação de usinas hidrelétricas HydroSim. A sequência de procedimentos está dividida em duas etapas: análise da coerência da base de dados e consolidação efetiva das funções.

No estudo de caso a metodologia foi aplicada a uma usina hidrelétrica que faz parte do Sistema Interligado Nacional e cuja operação está sob a coordenação e controle do Operador Nacional do Sistema Elétrico. A fim de avaliar os procedimentos, foram feitos estudos de reprodução da operação hidrelétrica, para o curtíssimo e curto prazo, alternando dados oficiais e dados consolidados de acordo com a técnica apresentada.

Os resultados mostram que a melhoria da qualidade dos dados, obtida com a aplicação da metodologia proposta, aproxima a operação simulada da operação real. Dessa forma, ela contribui para a eficiência, confiabilidade e análise de desempenho dos modelos computacionais em uso no setor elétrico brasileiro.

Abstract

This work presents tools and procedures for the data consolidation from Brazilian hydroelectric plants. The objective is to improve the quality of the input data to the computational models used in the mid and short term operation planning.

As support tool to the application of the methodology, are described: the data manager HydroData, the queries builder HydroConsulta and the simulator of the hydroelectric plants operation HydroSim. The procedures sequence is divided into two steps: analysis of the database coherency and effective consolidation of the functions.

In the case study the methodology was applied to a hydroelectric plant which is part of the National Interconnected System and whose operation is under the coordination and control of the Independent System Operator. In order to evaluate the procedures, were made studies of hydroelectric operation reproduction, to the mid and short term, alternating official data and consolidated data in accordance with the technique presented.

The results show that the improvement of the data quality, obtained with the application of the proposed methodology, brings the simulated and real operation closer. This way, it contributes to the efficiency, reliability and performance analysis of the computational models in use in the Brazilian electric sector.

Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Secundino, pela motivação durante o desenvolvimento do trabalho, pela atenção e apoio às minhas decisões.

Ao meu “orientador externo”, professor Darrell G. Fontane, pelo convite e oportunidade de desenvolver parte da minha pesquisa na Colorado State University (*CSU*) - EUA de 03/2008 a 06/2009 através do programa de Doutorado Sanduíche.

Aos meus co-orientadores, Marcelo e João Eduardo, pelas idéias, sugestões e valiosas contribuições técnicas a este trabalho.

Às pessoas que, além do orientador e dos co-orientadores, incentivaram ou colaboraram diretamente para que a experiência no exterior se concretizasse: Rosemary Rader, Rubem La Laina Porto, Paulo Sérgio Franco Barbosa, Renato Carlos Zambon, Thaís Gama de Siqueira, Noêmia da Silva Barros Benatti, Michel Daoud Yacoub e Ana Carolina Pinto Coelho Maran Gonçalves.

Às pessoas que enfatizaram a importância do assunto apresentado neste trabalho: Paulo Ricardo Laudanna (Duke), João Paulo Estrócio (CESP) e Sérgio Zuculin (CESP).

Aos colegas da UNICAMP e da CSU sempre solícitos.

À minha princesinha Nathalia pela companhia.

Este trabalho teve o apoio, em diferentes momentos, da Fundação de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (*CAPES*) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (*CNPq*).

Sumário

1. Introdução	1
1.1. O Sistema Elétrico Brasileiro.....	2
1.2. Planejamento da Operação Hidrotérmica.....	8
1.3. Importância da Qualidade dos Dados.....	14
1.4. Objetivo da Tese e Organização do Trabalho.....	18
2. Componentes do Problema	19
2.1. Equação de Balanço Hídrico e Função de Produção Hidrelétrica.....	20
2.2. Dados Físicos e Conceito de Rendimento Global.....	23
2.3. Dados de Operação.....	29
2.4. Características dos Dados do Setor Elétrico Brasileiro.....	33
3. Ferramentas Utilizadas	39
3.1. O Gerenciador de Dados HydroData.....	40
3.2. O Construtor de Consultas HydroConsulta.....	44
3.3. O Simulador da Operação de Usinas Hidrelétricas HydroSim.....	47
4. Metodologia para Consolidação de Dados	51
4.1. Análise da Coerência da Base de Dados.....	52
4.1.1. Coerência entre os Dados de Operação.....	52
4.1.2. Coerência dos Dados de Operação com os Limites da Usina.....	53
4.1.3. Coerência dos Dados de Operação com a Realidade Física.....	53
4.2. Consolidação Efetiva das Funções.....	54
4.2.1. Polinômio Área x Cota.....	55
4.2.2. Polinômio Cota x Volume.....	56
4.2.3. Polinômio Cota de Jusante x Defluência.....	57
4.2.4. Função de Potência Máxima.....	58
4.2.5. Função de Engolimento Máximo.....	60
4.2.6. Função de Rendimento Global.....	61

5. Estudo de Caso	65
5.1. Características do Cenário.....	66
5.2. Análise da Coerência da Base de Dados.....	66
5.2.1. Consistência da Queda Bruta.....	66
5.2.2. Consistência da Vazão Defluente.....	68
5.2.3. Consistência da Vazão Vertida.....	69
5.2.4. Consistência do Balanço Hídrico.....	71
5.2.5. Consistência com os Limites de Operação.....	73
5.2.6. Consistência da Vazão Afluente.....	75
5.2.7. Consistência dos Rendimentos Médio e Global Variável.....	77
5.3. Consolidação Efetiva das Funções.....	79
5.3.1. Polinômio Área x Cota.....	79
5.3.2. Polinômio Cota x Volume.....	80
5.3.3. Polinômio Cota de Jusante x Defluência.....	81
5.3.4. Função de Potência Máxima.....	82
5.3.5. Função de Engolimento Máximo.....	83
5.3.6. Função de Rendimento Global.....	84
6. Impacto da Qualidade dos Dados na Reprodução da Operação Hidrelétrica	87
6.1. Aplicações do Simulador HydroSim.....	88
6.2. Curtíssimo Prazo.....	89
6.2.1. Estudos 1 e 2 - Internos ao Período Utilizado na Consolidação.....	90
6.2.2. Estudos 3 e 4 - Posteriores ao Período Utilizado na Consolidação.....	94
6.3. Curto Prazo.....	97
6.3.1. Estudos 1 e 2 - Dados Oficiais.....	98
6.3.2. Estudos 3 e 4 - Dados Consolidados e Rendimento Global Médio.....	100
6.3.3. Estudos 5 e 6 - Dados Consolidados e Rendimento Global Variável.....	102
7. Conclusões e Trabalhos Futuros	105
7.1. Conclusões.....	106
7.2. Trabalhos Futuros.....	109
8. Referências Bibliográficas	111

Lista de Figuras

Figura 1.1	Consumo final energético por setor (MME, 2008).....	2
Figura 1.2	Consumo de energia elétrica por região (ANEEL, 2008).....	2
Figura 1.3	Estrutura institucional do setor elétrico brasileiro (ANEEL, 2008).....	3
Figura 1.4	Principais potenciais hidrelétricos tecnicamente aproveitáveis no mundo (ANEEL, 2008).....	6
Figura 1.5	Matriz de oferta de energia elétrica no Brasil (ANEEL, 2009a).....	6
Figura 1.6	Evolução da capacidade instalada do sistema brasileiro (ONS, 2007a e ANEEL, 2009a).....	7
Figura 1.7	Esquema da decomposição temporal do problema de planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos acompanhado dos modelos computacionais utilizados pelo SEB.....	10
Figura 1.8	Representação esquemática do sistema de suporte à decisão, HydroLab, em desenvolvimento na UNICAMP para o planejamento da operação do SIN	12
Figura 2.1	Esquema e principais variáveis de uma usina hidrelétrica (CICOGNA, 2003).....	20
Figura 2.2	Representação gráfica da equação de balanço hídrico.....	21
Figura 2.3	Polinômio área [km ²] x cota [m] para a usina Emborcação (CCEE, 2009)	23
Figura 2.4	Polinômio cota [m] x volume [hm ³] para a usina Emborcação (CCEE, 2009)	24
Figura 2.5	Polinômio do canal de fuga para a usina Emborcação (CCEE, 2009)	24
Figura 2.6	Função de potência máxima para a usina Chavantes (Fonte: DUKE)	25
Figura 2.7	Função de engolimento máximo para a usina Chavantes (Fonte: DUKE)	26
Figura 2.8	Função de rendimento de um gerador da usina de Itaipu (ARCE, 2006)	27

Figura 2.9	Função de rendimento da turbina de uma unidade geradora de Manso - Curva Colina (Fonte: FURNAS)	28
Figura 2.10	Representação da Curva Colina na forma de curvas de igual rendimento - Curvas de Nível.....	28
Figura 2.11	Função de produção, Equação 2.2, usando o conceito de rendimento global.....	28
Figura 2.12	Algoritmo de cálculo para obtenção da tabela que relaciona potência x queda bruta x vazão turbinada (CNEC, 1983/91).....	31
Figura 2.13	Apresentação dos dados do arquivo “Hidr.dat” de abril de 2009, utilizando o Excel.....	34
Figura 2.14	Polinômio cota de jusante x defluência de Xingó no “Hidr.dat” de abril de 2009.....	36
Figura 3.1	A janela principal do programa HydroData.....	40
Figura 3.2	Representação da variação do nível de montante em função do volume armazenado.....	42
Figura 3.3	Representação simplificada da variação do nível de montante em função do volume armazenado.....	42
Figura 3.4	Variação do nível de jusante em função da vazão defluente.....	43
Figura 3.5	Polinômio mal ajustado para a representação da cota de jusante x defluência.....	43
Figura 3.6	Função de rendimento da turbina de uma unidade geradora.....	43
Figura 3.7	Corte horizontal sobre a curva colina ao lado ($p = 89$ MW).....	43
Figura 3.8	A janela principal do programa HydroConsulta.....	44
Figura 3.9	A interface do HydroSim LP.....	48
Figura 3.10	A interface do HydroSim CP.....	49
Figura 4.1	Ajuste do polinômio cota x volume.....	56
Figura 4.2	Ajuste polinomial à nuvem de pontos da operação do canal de fuga.....	57
Figura 4.3	Ajuste da função de potência máxima para uma máquina.....	59
Figura 4.4	Ajuste da função de potência máxima para todas as máquinas da usina.....	59
Figura 4.5	Ajuste da função de engolimento máximo para uma máquina.....	60

Figura 4.6	Ajuste da função de engolimento máximo para todas as máquinas da usina.....	61
Figura 5.1	Comando SQL, automaticamente gerado pelo HydroConsulta, para listar os registros de queda bruta inconsistente da usina analisada.....	67
Figura 5.2	Lista dos registros de queda bruta negativa da usina analisada.....	68
Figura 5.3	Comando SQL, automaticamente gerado pelo HydroConsulta, para listar os registros que apresentam inconsistência da vazão defluente em relação às vazões computadas como saída do aproveitamento.....	69
Figura 5.4	Comando SQL, automaticamente gerado pelo HydroConsulta, para listar os registros que apresentam inconsistência da vazão vertida total em relação à soma dos três tipos de vertimento registrados pela usina.....	70
Figura 5.5	Lista dos registros inconsistentes de vazão vertida total	71
Figura 5.6	Em negrito, dados fornecidos como entrada ao simulador para conferência do balanço hídrico.....	71
Figura 5.7	Trajetória de armazenamento registrada apresentada pelo HydroData	72
Figura 5.8	Trajetória de armazenamento simulada apresentada pelo HydroSim.....	73
Figura 5.9	Comando SQL, automaticamente construído pelo sistema, para lista os valores médios diários de vazão afluyente à usina analisada.....	76
Figura 5.10	Lista das vazões afluentes médias diárias.....	77
Figura 5.11	Comando SQL gerado pelo HydroConsulta para apresentar o rendimento médio da usina analisada.....	77
Figura 5.12	Comando SQL gerado pelo HydroConsulta para listar os valores de rendimento global variável da usina.....	78
Figura 5.13	Distribuição da frequência do rendimento global variável da usina no período de 01/01/2000 a 01/01/2007.....	78
Figura 5.14	Consolidação do polinômio área x cota.....	80
Figura 5.15	Consolidação do polinômio cota x volume.....	81
Figura 5.16	Consolidação do polinômio cota de jusante x defluência.....	81
Figura 5.17	Consolidação da função de potência máxima.....	82
Figura 5.18	Consolidação da função de engolimento máximo.....	83
Figura 5.19	Curva colina de rendimento da turbina x rendimento global.....	84

Figura 6.1	Em negrito, dados fornecidos como entrada ao simulador quando a meta é a reprodução da trajetória de vazão turbinada registrada.....	88
Figura 6.2	Em negrito, dados fornecidos como entrada ao simulador quando o objetivo é a reprodução da trajetória de geração registrada.....	89
Figura 6.3	Trajetoórias registradas e simuladas para os Estudos 1 e 2 do curtíssimo prazo.....	91
Figura 6.4	Detalhes da Figura 5.16 para a área do gráfico que apresenta os registros de operação.....	92
Figura 6.5	Trajetoária de armazenamento registrada e simulada usando dados físicos oficiais.....	93
Figura 6.6	Trajetoária de armazenamento registrada e simulada usando o polinômio cota de jusante x defluência consolidado.....	93
Figura 6.7	Trajetoária de armazenamento registrada e simulada usando o polinômio cota de jusante x defluência e a fun���o de rendimento global consolidados.....	93
Figura 6.8	Trajetoórias registradas e simuladas para os Estudos 3 e 4 do curtíssimo prazo.....	95
Figura 6.9	Trajetoórias registradas e simuladas para os Estudos 1 e 2 do curto prazo....	99
Figura 6.10	Trajetoórias registradas e simuladas para os Estudos 3 e 4 do curto prazo	101
Figura 6.11	Trajetoórias registradas e simuladas para os Estudos 5 e 6 do curto prazo	103

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Análise dos dados do arquivo “Hidr.dat” de abril de 2009.....	35
Tabela 3.1	Classificação das usinas do HydroData.....	41
Tabela 3.2	Ações dos botões de gerenciamento das consultas.....	45
Tabela 4.1	Classificação dos dados em físicos e de operação.....	54
Tabela 5.1	Violação dos limites de operação da usina analisada.....	74
Tabela 5.2	Pontos “área x cota” consolidados.....	79
Tabela 5.3	Pontos “área x cota x volume” consolidados.....	80
Tabela 5.4	Matriz de rendimento global.....	84
Tabela 5.5	Função associada e estimativa das perdas da turbina, do gerador, e do circuito hidráulico.....	85
Tabela 6.1	Características dos estudos de curtíssimo prazo.....	89
Tabela 6.2	Análise estatística dos estudos de curtíssimo prazo.....	96
Tabela 6.3	Características dos estudos de curto prazo.....	97
Tabela 6.4	Análise estatística dos estudos de curto prazo.....	104

Lista de Siglas

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ANA	Agência Nacional das Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo
BDR	Banco de Dados Relacional
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
C	Comercialização
CADE	Conselho Administrativo de Defesa Econômica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CMO	Custo Marginal de Operação
CNEC	Conselho Nacional de Engenheiros Consultores
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPPE	Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia
COSE	Coordenação da Operação de Sistemas Eletroenergéticos
D	Distribuição
DENSIS	Departamento de Engenharia de Sistemas
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EP	Escola Politécnica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FEC	Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
FEEC	Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
FPO	Fluxo de Potência Ótimo
G	Geração
GPS	Global Positioning System
GRG2	Gradiente Reduzido Genérico
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
MME	Ministério de Minas e Energia

MS	Método Simplex
ONS	Operador Nacional do Setor Elétrico
PAR- p	Periódicos Auto-Regressivos de ordem p
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PD	Programação Dinâmica
PDDD	Programação Dinâmica Dual Determinística
PDDE	Programação Dinâmica Dual Estocástica
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PL	Programação Linear
PMO	Planejamento Mensal da Operação
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
SDE/MJ	Secretaria de Direito Econômico do Ministério da Justiça
SEAE	Secretaria de Acompanhamento Econômico
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
SQL	Structured Query Language
T	Transmissão
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UHE	Usina Hidrelétrica
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
USP	Universidade de São Paulo

Lista de Símbolos

- $\hat{a}$ é o valor do limite inferior ou superior da variável.
- a_i é a variável analisada do registro de índice i .
- A_j é a área do reservatório na linha j da tabela área $\times$ cota [km^2].
- A_{j-1} é a área do reservatório na linha $j - 1$ da tabela área $\times$ cota [km^2].
- c é um valor constante.
- ev é a evaporação líquida do reservatório, isto é, a diferença entre a evapotranspiração da área antes do alagamento e a evaporação do reservatório, durante o intervalo [m^3/s].
- h_b é a altura de queda bruta, $\phi(x) - \theta(u)$, [m].
- h_{ef} é a queda efetiva [m].
- h_l denomina-se altura de queda líquida, h_l , a diferença entre a altura de queda bruta e a perda hidráulica, ou seja, $h_l = \phi(x) - \theta(u) - h_p$ [m].
- h_p é a perda de carga hidráulica que a água sofre no canal de adução, desde o reservatório até as turbinas [m].
- i é o índice da operação registrada na base de dados da usina.
- j é o índice da linha da tabela área $\times$ cota.
- k é a constante da gravidade, multiplicada pela massa específica da água e dividida por 10^6 . Seu valor é $0,00981$ [$\text{MW}/(\text{m}^3/\text{s})/\text{m}$].
- min é o menor valor aceitável para o rendimento global.
- max é o maior valor aceitável para o rendimento global.
- num é o número de operações registradas na base de dados da usina.
- p é a potência obtida no processo de conversão da energia potencial em energia elétrica [MW médio].
- p_{ef} é a potência efetiva [MW].
- q é a vazão turbinada pela casa de máquinas (engolimento) [m^3/s].
- q_{ef} é o engolimento efetivo [m^3/s].
- q^* é a vazão turbinada calculada [m^3/s].
- u é a vazão descarregada pela usina, $q + v$, (defluência) [m^3/s].

- uc é o uso consuntivo do reservatório e na bacia incremental da usina durante o intervalo $[m^3/s]$.
- v é a vazão descarregada pelo vertedor (vertimento) $[m^3/s]$.
- v_{total} é o vertimento total da usina $[m^3/s]$.
- x é o volume do reservatório $[hm^3]$.
- $\bar{x}$ é o volume máximo operativo do reservatório $[hm^3]$.
- $\underline{x}$ é o volume mínimo operativo do reservatório $[hm^3]$.
- x_0 é o volume do reservatório no início da operação do intervalo $[hm^3]$.
- $x_{útil}$ é o volume útil do reservatório, $\bar{x} - \underline{x}$, $[hm^3]$.
- y é a vazão afluente incremental à usina durante o intervalo $[m^3/s]$.
- zm_j é o nível de montante na linha j da tabela área x cota $[m]$.
- zm_{j-1} é o nível de montante na linha $j - 1$ da tabela área x cota $[m]$.
- Δt é a duração do intervalo $[s]$. A fração $\Delta t / 10^6$ é um fator de conversão de unidades de vazão $[m^3/s]$ para volume $[hm^3]$.
- Δzm é a variação do nível de montante, ou seja, $zm_j - zm_{j-1}$ $[m]$.
- η_{med} é o rendimento médio da usina, embutido na produtividade específica.
- η_g é o rendimento do gerador.
- η_t é o rendimento da turbina.
- η^G é o rendimento global da usina.
- $\bar{\eta}^G$ é o rendimento global médio da usina.
- η_i^G é o rendimento global da usina, implícito na base de dados, para a potência, queda bruta e vazão turbinada do registro de índice i .
- η_i^{G*} é o rendimento global da usina, calculado usando a matriz de rendimento global, para a potência e queda bruta do registro de índice i .
- $\eta_{l,c}^G$ é o rendimento global da usina na célula de linha l e coluna c da matriz.
- $\theta(u)$ é a cota de jusante do canal de fuga (função da defluência) $[m]$.
- ξ é o valor da tolerância.
- $\phi(x)$ é a cota de montante do reservatório (função do volume) $[m]$.
- Ω é o conjunto das usinas imediatamente à montante da usina considerada.
- δ é o grau de violação média do limite inferior ou superior da variável.

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo está dividido em quatro seções. Nas duas primeiras são apresentadas as características do sistema elétrico brasileiro. Na terceira seção, destaca-se a importância da qualidade dos dados fornecidos aos modelos computacionais utilizados no planejamento e na programação da operação energética. Na quarta, define-se o objetivo da tese e a organização deste trabalho.

1.1 O Sistema Elétrico Brasileiro

O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico de um país e do nível de qualidade de vida da sociedade. Ele reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços quanto a capacidade da população para adquirir bens tecnologicamente avançados.

Entre os maiores consumidores de energia elétrica estão: o setor industrial, o de transportes e o residencial, conforme Figura 1.1. Em termos regionais, o Sudeste/Centro Oeste lidera o ranking do consumo por ser a região mais industrializada e com atividade agropecuária bastante ativa, Figura 1.2.

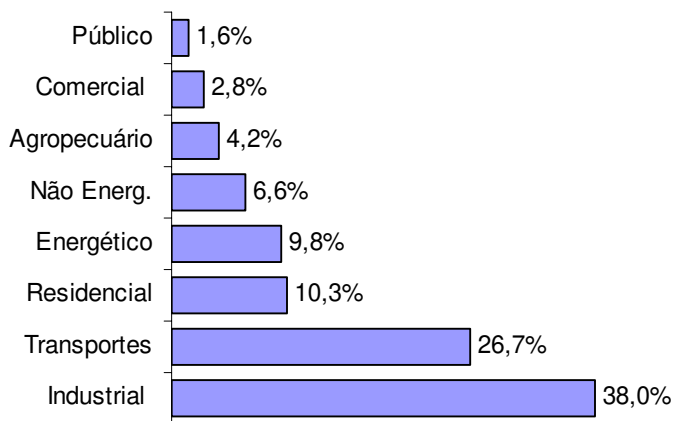


Figura 1.1 Consumo final energético por setor (MME, 2008).

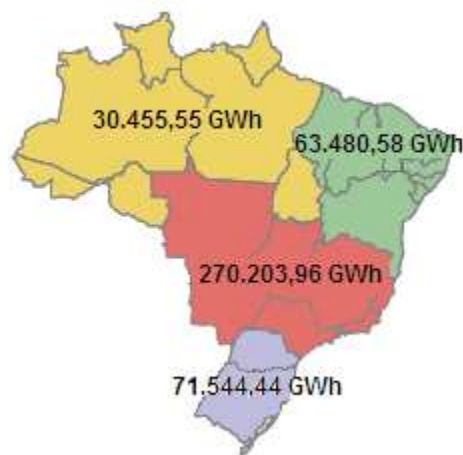


Figura 1.2 Consumo de energia elétrica por região (ANEEL, 2008).

Atualmente, o sistema elétrico brasileiro supera 100.000 MW em potência instalada, dos quais aproximadamente 75% são de fonte hídrica e 25 % são de fonte térmica. Ele possui características que o distingue dos demais sistemas do mundo e que tornam desafiadora a tarefa de planejamento da produção de energia elétrica. Dentre as características desse sistema, destacam-se: o elevado número de usinas hidrelétricas operando em conjunto numa mesma bacia hidrográfica, a diversidade hidrológica das regiões, as grandes distâncias entre os recursos naturais disponíveis e as principais áreas de consumo, a dimensão da rede de transmissão e a presença de múltiplos agentes econômicos com diferentes interesses.

Nesse contexto, o modelo institucional do setor de energia elétrica passou por duas grandes mudanças desde a década de 90. A primeira iniciou em 1996 e envolveu a

privatização das companhias operadoras. A segunda aconteceu em 2004 e marcou a retomada da responsabilidade do planejamento do setor pelo Estado.

Na Figura 1.3, apresenta-se a atual estrutura institucional do Setor Elétrico Brasileiro (*SEB*).

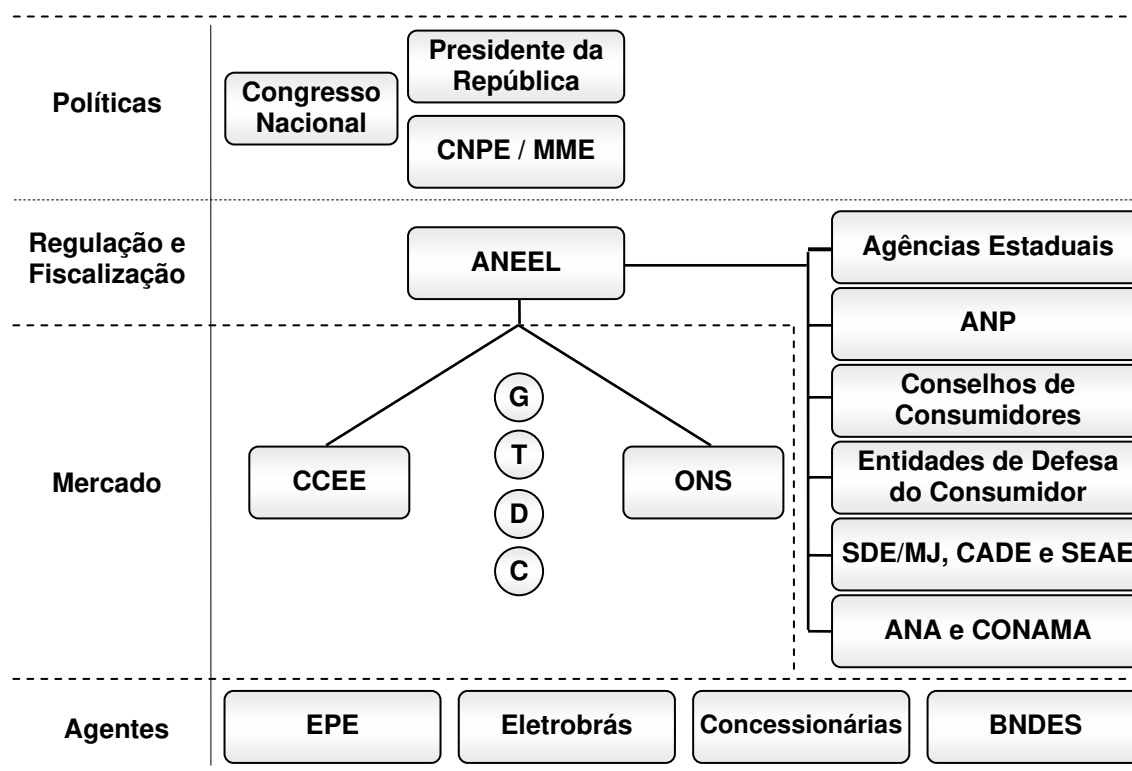


Figura 1.3 Estrutura institucional do setor elétrico brasileiro (ANEEL, 2008).

De acordo com a Figura 1.3, a estrutura institucional do setor elétrico está dividida em quatro partes: *Políticas*, *Regulação e Fiscalização*, *Mercado* e *Agentes*.

- **Políticas:** neste item, além do Presidente da República e do Congresso Nacional, atuam em conjunto o Conselho Nacional de Política Energética (*CNPE*) e o Ministério de Minas e Energia (*MME*). O CNPE é o órgão de assessoramento do Presidente da República para a formulação de políticas e diretrizes de energia. O MME é responsável pelas áreas de geologia, recursos minerais e energéticos.
- **Regulação e Fiscalização:** neste item, encontra-se a Agência Nacional de Energia Elétrica (*ANEEL*) que tem como atribuições: regular e fiscalizar a geração, a transmissão, a distribuição e a comercialização da energia elétrica. Associadas à

ANEEL estão: as Agências Estaduais, a Agência Nacional do Petróleo (ANP), os Conselhos de Consumidores, as Entidades de Defesa do Consumidor, a Secretaria de Direito Econômico do Ministério da Justiça (SDE)/MJ, o Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE), a Secretaria de Acompanhamento Econômico (SEAE), a Agência Nacional das Águas (ANA) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

- **Mercado:** este item relaciona a geração (*G*), transmissão (*T*), distribuição (*D*) e comercialização (*C*) de energia elétrica. Nele atuam a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e o Operador Nacional do Setor Elétrico (ONS). Ambos são entidades de direitos privados, sem fins lucrativos e operam sob a fiscalização e regulação da ANEEL. A CCEE tem a finalidade de viabilizar as operações de compra e venda de energia elétrica. O ONS é responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN).
- **Agentes:** neste item estão: a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Eletrobrás, as Concessionárias e o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). A EPE presta serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento da expansão do setor energético. A Eletrobrás dá suporte aos programas estratégicos do governo. As Concessionárias prestam serviço público de geração, distribuição ou transmissão de energia elétrica. Por fim, o BNDES tem como objetivo apoiar empreendimentos que contribuam para o desenvolvimento do país.

Desenvolvimento Sustentável

A atividade de produção de energia elétrica finalizou o século XX em busca do *desenvolvimento sustentável*. Este conceito baseia-se em dois pilares: a *eficiência energética* e a utilização das *energias renováveis*. A eficiência energética consiste na utilização racional da energia, isto é, obter o mesmo resultado utilizando menor quantidade de energia elétrica. Energias renováveis são aquelas obtidas de fontes naturais capazes de se regenerar, como por exemplo: a energia hidráulica, solar, eólica, geotérmica, maremotriz e

biomassa. O desafio consiste em suprir as necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das gerações futuras.

Várias medidas têm sido adotadas pelo governo a favor do desenvolvimento sustentável. Em 1993 o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (*PROCEL*) junto com o Programa Brasileiro de Etiquetagem (*PBE*) e o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (*Inmetro*) lançou o *Selo Procel*. Este selo reconhece a excelência energética de um equipamento em relação aos demais disponíveis. Ele ganhou expressividade a partir do racionamento de 2001, tornando-se um elemento de *marketing*.

O PROCEL também investiu em publicação e distribuição de manuais destinados a orientar os consumidores no uso eficiente da eletricidade. Ele também desenvolveu programas pedagógicos junto às escolas de ensino fundamental e criou cursos técnicos de competência específica em eficiência energética.

A partir de 1998 surgiram os programas de Pesquisa e Desenvolvimento (*P&D*). Estes programas obrigam as empresas do setor elétrico a investirem 0,25% de sua receita operacional líquida em programas e ações que se caracterizem pela eficiência energética. Segundo a ANEEL (2008), o total de recursos aplicados entre 1998 e 2007 em programas de P&D foi de R\$ 1,3 bilhão.

Em 2008, realizou-se o primeiro leilão de biomassa, energia gerada pela queima do bagaço de cana-de-açúcar. Numa escala ainda reduzida e experimental, têm sido criados incentivos à produção de energia pela queima do lixo urbano e pela utilização do metano associado a dejetos de suínos. O setor finalizou o ano de 2008 com o leilão da maior linha de transmissão do mundo, uma conexão elétrica de 2.400 km que liga as usinas do Complexo do rio Madeira com o SIN (ANEEL, 2008).

Parque Gerador

Embora exista o incentivo à utilização de fontes alternativas de produção de energia elétrica, o Brasil é, em âmbito mundial, um dos países de maior potencial hidrelétrico tecnicamente aproveitável, conforme ilustrado na Figura 1.4.

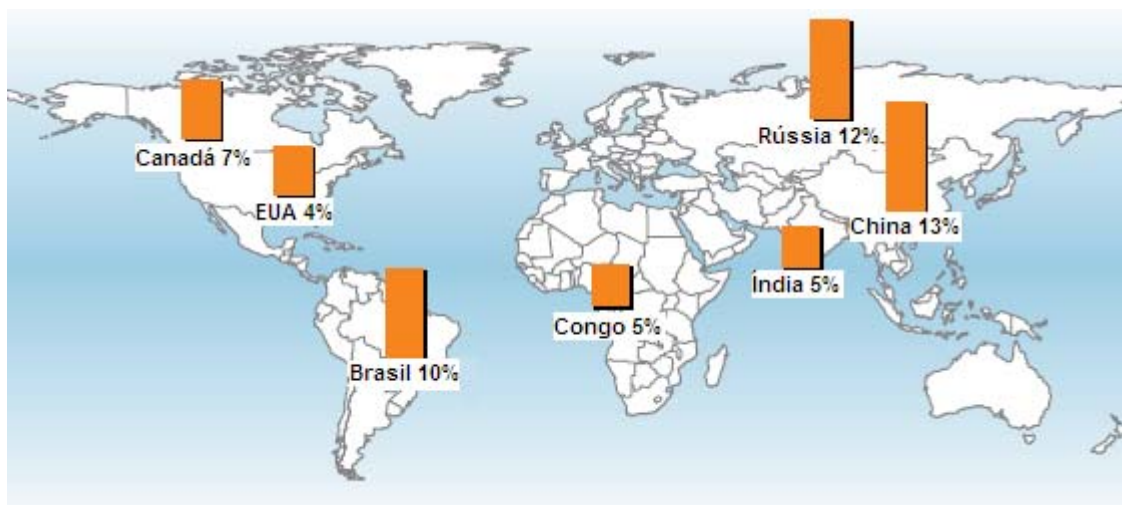


Figura 1.4 Principais potenciais hidrelétricos tecnicamente aproveitáveis no mundo (ANEEL, 2008).

O potencial hidrelétrico brasileiro é de 260.000 MW, dos quais pouco mais de 30% estão sendo explorados. Além disso, a utilização de recursos hídricos é uma das formas de obtenção de energia mais barata, eficiente e com menor nível de poluição durante a operação. Estes fatores justificam a expressividade da oferta de energia hidráulica em relação às demais fontes, Figura 1.5.

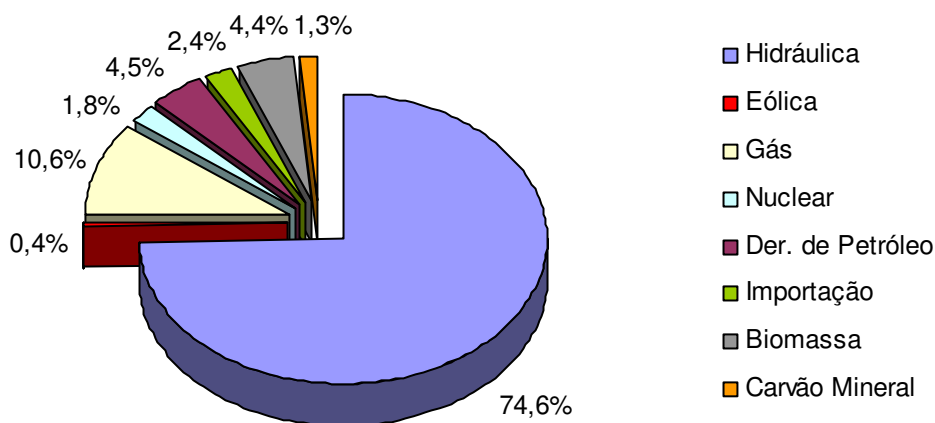


Figura 1.5 Matriz de oferta de energia elétrica no Brasil (ANEEL, 2009a).

Na Figura 1.6, apresenta-se a evolução da capacidade instalada do sistema brasileiro desde 1970. Os dados são apresentados em GW e dá-se destaque para os dois tipos de usinas geradoras de maior importância no Brasil: hidrelétricas e termelétricas.

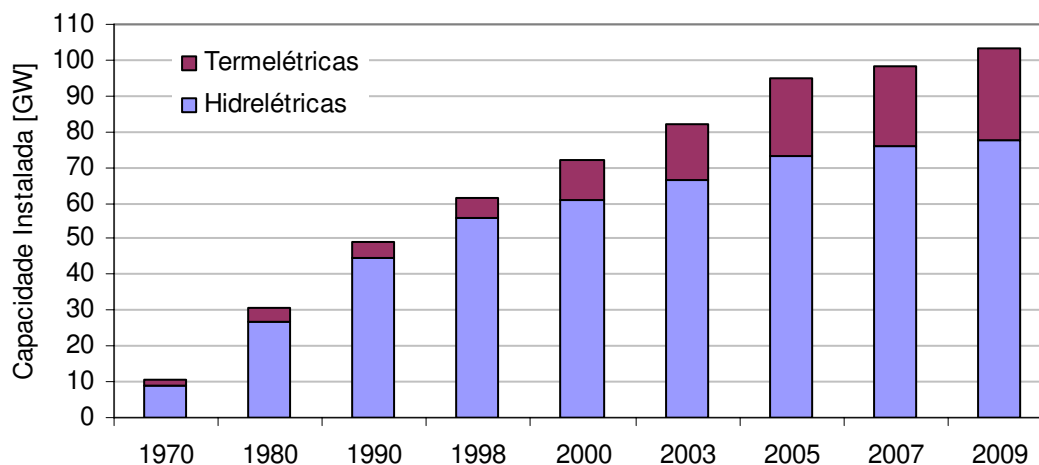


Figura 1.6 Evolução da capacidade instalada do sistema brasileiro (ONS, 2007a e ANEEL, 2009a).

Os aumentos na capacidade instalada de energia elétrica ao longo das últimas décadas têm como objetivo suportar o desenvolvimento econômico do país, o crescimento da população, a regularização de ligações clandestinas e a evolução dos domicílios atendidos em função do programa *Luz para Todos*.

Apesar da crescente utilização de fontes alternativas de geração de energia, a predominância de energia hidráulica se mantém e, segundo a ANEEL (2008), ela continuará sendo por muitos anos a principal fonte geradora de energia elétrica do Brasil.

Embora a energia hidráulica seja considerada “limpa” no mercado internacional, as áreas alagadas pela construção das barragens trazem impactos sobre o modo de vida da população, flora e fauna locais. Em alguns casos, a decomposição do material orgânico remanescente após o enchimento do reservatório libera gases associados ao efeito estufa. Por isso, o impacto desse tipo de empreendimento é medido pela relação entre a capacidade de produção da usina e a área inundada. Por exemplo, a usina de Itaipu tem capacidade instalada de 14.000 MW e inunda uma área de 1.350 km². Na usina de Tucuruí são 8.365 MW para 2.414 km², o triplo da área inundada para cada MW instalado (ZAMBON, 2008). Um caso extremo desse tipo de problema é a usina de Balbina, localizada próxima à cidade de Manaus, AM. Ela inundou uma área de 2.360 km² para uma capacidade de apenas 250 MW. Essa usina emite mais gases de efeito estufa que uma termelétrica de mesma capacidade (KEMENES, 2006).

Nesse contexto, o planejamento da operação do sistema hidrotérmico brasileiro é de fundamental importância, visando à otimização dos recursos energéticos do sistema.

1.2 Planejamento da Operação Hidrotérmica

O objetivo do planejamento da operação de um sistema hidrotérmico de energia elétrica é assegurar uma política de operação econômica e confiável para o sistema. O resultado é uma sequência de decisões de despacho de geração que procure minimizar o custo da operação e garantir o atendimento do mercado com segurança.

A diminuição do custo da operação envolve a substituição de geração termelétrica por hidrelétrica. Como os recursos hídricos, representados pela água armazenada nos reservatórios e pelas afluições às usinas, são limitados, deve haver um compromisso entre o presente e o futuro. Essa característica torna o problema *dinâmico*, ou seja, o estado de armazenamento dos reservatórios no presente depende das decisões anteriores, e as decisões atuais influenciam a operação futura.

O elevado número de aproveitamentos com reservatórios de acumulação e as características de regularização plurianual do sistema brasileiro implicam a adoção de longos períodos de estudo para o planejamento da operação. Isso caracteriza o problema como de *grande porte*.

Outro fator que dificulta o planejamento da operação energética é o acoplamento operativo entre as usinas pertencentes a uma mesma bacia hidrográfica. Ao contrário do parque termelétrico, no qual todas as usinas são independentes entre si, numa mesma bacia hidrográfica, as hidrelétricas constituem um sistema *interconectado* de geração.

Além da interdependência operativa entre usinas pertencentes à mesma bacia, a operação do sistema deve respeitar as *restrições dos usos múltiplos* da água, tais como: abastecimento urbano e industrial, navegação, irrigação, recreação, controle de cheias e pesca. Os conflitos decorrentes dos usos múltiplos da água geram restrições operacionais ao sistema.

O SIN é responsável por 96,6 % da energia elétrica produzida no país e permite a transferência de energia entre o Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte do Norte. No entanto, essas conexões regionais aumentam a complexidade do sistema hidrotérmico, pois as decisões de geração tornam-se sujeitas às *restrições de intercâmbio*.

As vazões afluentes futuras que chegarão aos reservatórios do sistema dependem das condições climáticas. Isso adiciona um caráter *estocástico* ao planejamento da operação.

Além das características citadas anteriormente, acrescenta-se à complexidade do problema o fato das funções de produção hidrelétrica e de custo da complementação térmica serem *não lineares*.

O planejamento da operação energética do sistema hidrotérmico brasileiro é, portanto, um problema de otimização dinâmico, de grande porte, interconectado, com restrições de usos múltiplos da água, com restrições de intercâmbio, estocástico e não linear. Sua complexidade requer a criação de etapas de planejamento baseadas em diferentes horizontes de estudo.

Para exemplificar a dependência do problema com o horizonte de estudo, pode-se citar o impacto da aleatoriedade das vazões na operação do sistema. Em se tratando de horizontes anuais, é grande o impacto que a incerteza das vazões tem na operação dos reservatórios, uma vez que a magnitude das vazões define se os reservatórios estarão mais cheios ou vazios ao final do horizonte de planejamento. Já em horizontes de pequena duração, como por exemplo: uma semana, o impacto da aleatoriedade das vazões na programação da operação é menor.

A seguir são detalhadas as etapas do planejamento da operação hidrotérmica adotadas pelo SEB e uma proposta em desenvolvimento na Universidade Estadual de Campinas (*UNICAMP*).

Modelo Adotado pelo SEB

O modelo adotado pelo SEB divide-se em: *Planejamento Energético* e *Programação da Operação*. Estas etapas englobam os horizontes de médio, curto e curtíssimo prazo, apresentados na Figura 1.7.

No médio prazo o horizonte é de até 5 anos, com discretização mensal. Como o grau de incerteza das vazões é alto, considera-se importante o uso de modelos estocásticos. Nesse horizonte, a representação individualizada das usinas hidrelétricas e a consideração estocástica das afluições em um único modelo matemático, tornam-se extremamente difíceis.

O curto prazo abrange um horizonte de até 1 ano, com discretização mensal ou semanal. Como o grau de incerteza das vazões é menor que no médio prazo, o problema

pode ser tratado de forma determinística e deve fornecer decisões de operação por usina. Nesse horizonte, considera-se o acoplamento hidráulico e as possíveis diversidades hidrológicas entre os rios.

No curtíssimo prazo o horizonte é de até duas semanas. O objetivo é determinar o despacho ótimo horário de geração para o sistema hidrotérmico, de modo a minimizar o custo total da operação no período de planejamento. Como o horizonte é pequeno, os valores de aflúências são considerados conhecidos e todos os aspectos energéticos, hidráulicos e elétricos, não levados em conta nas etapas de planejamento com horizontes mais amplos, devem ser considerados.

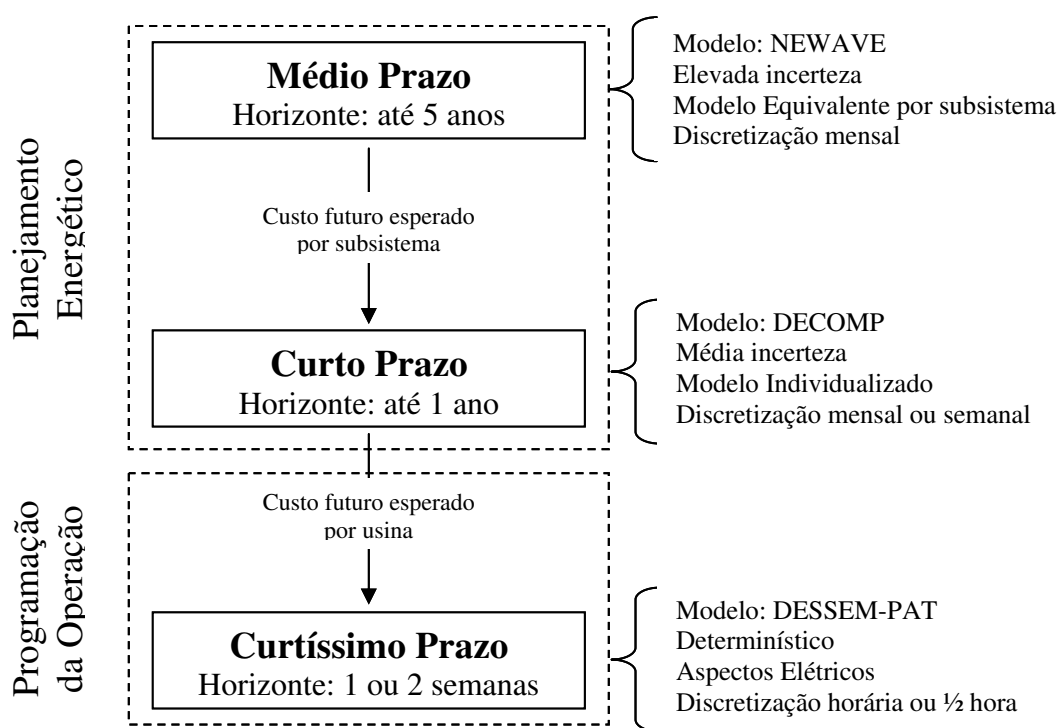


Figura 1.7 Esquema da decomposição temporal do problema de planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos acompanhado dos modelos computacionais utilizados pelo SEB.

Para implementar as etapas descritas anteriormente, o SEB utiliza os modelos computacionais: NEWAVE, DECOMP e DESSEM-PAT que correspondem aos horizontes de médio, curto e curtíssimo prazo, respectivamente. Esses modelos foram desenvolvidos no Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL), com a participação da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). De forma resumida, eles possuem as seguintes características:

- **NEWAVE:** este modelo utiliza Programação Dinâmica Dual Estocástica (*PDDE*), conforme metodologia proposta nos trabalhos de Pereira (1985), Pereira e Pinto (1985) e Pereira (1989). O objetivo é minimizar o custo esperado da operação do sistema. A fim de contornar a “maldição da dimensionalidade” da Programação Dinâmica (*PD*), ele utiliza a abordagem de sistemas equivalentes e reservatórios de energia. Os resultados desse modelo, para um horizonte de até cinco anos, são os despachos mensais de geração hidráulica e térmica nos subsistemas equivalentes, o intercâmbio de energia entre os subsistemas e a função de custo futuro. A função de custo futuro traduz em termos econômicos o custo da utilização da água armazenada nos reservatórios (CEPEL, 2002).
- **DECOMP:** este modelo também baseia-se na PDDE. Ele desagrega os subsistemas equivalentes em usinas individualizadas. O horizonte de planejamento é de até 1 ano, com discretização semanal para o primeiro mês, utilizando afluências estimadas por um conjunto de modelos de previsão de vazões; e mensal para os demais meses, considerando cenários de afluências (RODRIGUES et al., 2001). Além de determinar as parcelas de geração hidráulica e térmica para cada usina do sistema, esse modelo define o chamado Custo Marginal de Operação (*CMO*). O CMO equivale ao custo operacional da usina térmica mais cara despachada ou ao custo futuro mais elevado da água. Ele é calculado para cada subsistema e é utilizado para definir o preço da energia (R\$/MWh) no mercado de curto prazo (CEPEL, 2006).
- **DESSEM-PAT:** baseado em Programação Dinâmica Dual Determinística (*PDDD*), esse modelo é utilizado em um horizonte de até duas semanas, com discretização semi-horária na primeira semana e horária na segunda. Tal modelo tem como meta representar com detalhes as restrições de usinas hidrelétricas e termelétricas. A transmissão é modelada por uma representação linearizada da rede elétrica ou apenas pelos limites de intercâmbio entre os subsistemas (RODRIGUES et al., 2001). Esse modelo encontra-se em fase final de testes para sua implantação.

O NEWAVE e o DECOMP são executados pelo menos uma vez por mês com a presença, principalmente, dos representantes das empresas de geração e de comercialização de energia. Nessa reunião é realizado o Planejamento Mensal da Operação (*PMO*).

Modelo Proposto pela UNICAMP

O laboratório de Coordenação da Operação de Sistemas Eletroenergéticos do Departamento de Engenharia de Sistemas (*COSE/DENSIS*) da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (*FEEC*) da UNICAMP vem desenvolvendo um sistema de suporte à decisão, denominado HydroLab (CICOGNA, 2003), para planejar a operação de sistemas hidrotérmicos.

O sistema da UNICAMP também agrupa seus modelos nas categorias: planejamento energético e programação da operação. Estas categorias são suportadas por uma base de dados, chamada HydroData (CICOGNA, 2003). Esta base de dados, assim como outras bases do SEB, pode ser consultada, de forma prática e detalhada, pelo gerenciador de consultas HydroConsulta (HIDALGO, 2004).

Na Figura 1.8, mostra-se uma representação esquemática do sistema de suporte à decisão HydroLab. Atualmente, ele compreende seis módulos para o planejamento e a programação da operação e dois módulos de apoio.

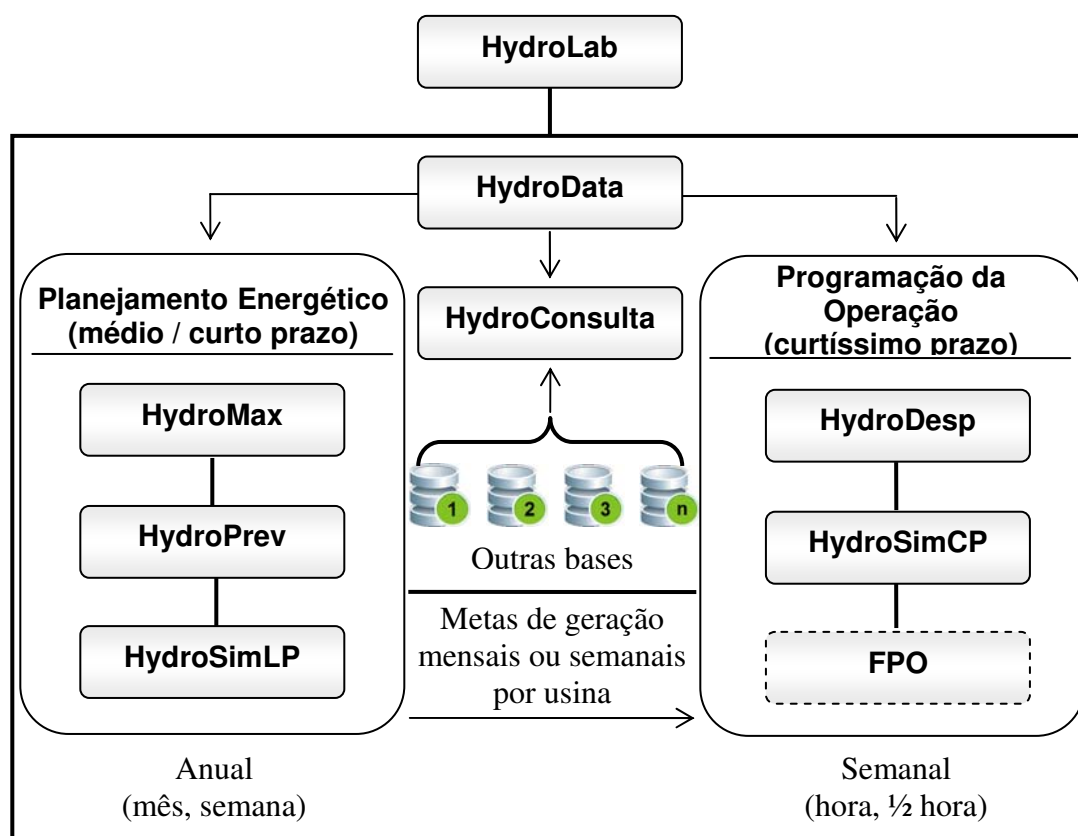


Figura 1.8 Representação esquemática do sistema de suporte à decisão, HydroLab, em desenvolvimento na UNICAMP para o planejamento da operação do SIN.

Planejamento Energético

Para a solução do problema de planejamento da operação energética, na UNICAMP, dispõe-se de um modelo de otimização determinística a usinas individualizadas (HydroMax) alimentado por um modelo de previsão de vazões (HydroPrev). Um simulador a usinas individualizadas (HydroSim LP) permite testar o desempenho dessa e de outras políticas operacionais em situações de operação real no sistema brasileiro. Os modelos envolvidos nessa etapa possuem as seguintes características.

- **HydroMax:** modelo de otimização determinística a usinas individualizadas, baseado em algoritmos de fluxo em rede não-linear com arcos capacitados. Sua função objetivo principal é minimizar o custo da complementação não hidráulica ao longo de um horizonte de estudo. A técnica utilizada é baseada no gradiente reduzido. Esse modelo usa a equação de balanço hídrico para cada nó da rede que representa uma usina (CARVALHO e SOARES, 1987; OLIVEIRA e SOARES, 1995 e CICOGNA, 1999).
- **HydroPrev:** modelo estocástico de previsão de vazões médias mensais baseado em redes neurais combinadas com lógica *fuzzy*. Esse modelo permite a visualização das previsões em forma de gráficos ou de tabelas, para todo o histórico ou períodos específicos (BALLINI, 2000).
- **HydroSim LP:** modelo de simulação a usinas individualizadas capaz de representar em detalhes as restrições operacionais em horizontes de médio e curto prazo (CICOGNA, 2003).

Como resultado dessa etapa de planejamento, obtém-se metas de geração mensais ou semanais, por usina, que são fornecidas como dados de entrada para a programação da operação.

Programação da Operação

Para a solução do problema de programação da operação, na UNICAMP, dispõe-se de um modelo de otimização para o despacho horário de máquinas e de geração (HydroDesp). Um simulador a usinas individualizadas (HydroSim CP) permite validar as

restrições hidráulicas ativadas pelo despacho de geração determinado por esse otimizador. Por fim, um modelo de fluxo de potência ótimo (FPO) é utilizado para validar, eletricamente, o despacho das usinas hidrelétricas e termelétricas. Os modelos desenvolvidos para a programação da operação possuem as seguintes características.

- **HydroDesp:** modelo de otimização determinística do despacho de máquinas e de geração em usinas hidrelétricas. Nesse modelo é utilizada uma metodologia de aferição das perdas de geração devidas: à elevação do canal de fuga, aos atritos nos condutos forçados e às variações de rendimento do conjunto turbina/gerador. Estas perdas compõem a função objetivo junto com os custos de combustível de geração termelétrica e os custos de partida e parada das unidades geradoras (ARCE et al., 2002; ARCE et al. 2003).
- **HydroSim CP:** modelo de simulação que representa, de forma individualizada, um conjunto de restrições relacionadas às condições operativas das usinas hidrelétricas em horizontes de curtíssimo prazo (CICOGNA, 2003).
- **FPO:** modelo de fluxo de potência ótimo cujo objetivo é minimizar os custos com perdas na rede de transmissão e os desvios quadráticos em relação ao despacho de geração determinado pelos modelos anteriores (OLIVEIRA et al., 2003; AZEVEDO, 2006).

No Capítulo 3 serão fornecidos detalhes relacionados aos modelos HydroData, HydroConsulta e HydroSim. Estes módulos integram o conjunto de ferramentas utilizadas para a consolidação dos dados das usinas hidrelétricas brasileiras.

1.3 Importância da Qualidade dos Dados

Conforme mencionado na seção anterior, o Brasil possui características peculiares que tornam o problema de planejamento da operação hidrotérmica complexo. Por essa razão, esse planejamento é feito com o auxílio de ferramentas computacionais para otimização, simulação e previsão de vazões. Estas ferramentas manipulam dados em modelos matemáticos. A qualidade dos dados utilizados como entrada aos modelos computacionais tem grande influência sobre o resultado apresentado. Algumas vezes, o que

explica o comportamento inesperado de um modelo é a baixa qualidade dos dados fornecidos a eles (LOPES, 2003).

A necessidade de acompanhamento e consolidação de dados não se restringe a grandes e complexos sistemas de geração elétrica, como o brasileiro. Isso porque toda medida está sujeita a erros que podem ser de precisão ou até mesmo grosseiros. Os erros de precisão, chamados sistemáticos, dependem do instrumento ou do método de medição utilizado. Os erros grosseiros, conhecidos como acidentais, podem ser causados por leitura incorreta ou engano nos cálculos (TAYLOR, 1999).

Além do grupo do CEPEL e do COSE/UNICAMP, existem outros núcleos de pesquisa trabalhando na área de planejamento e/ou programação da operação do SIN. Entre eles, podem ser citados: a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (*FEC*) – UNICAMP; a Escola Politécnica (*EP*) – USP; a Escola de Engenharia de São Carlos (*EESC*) – USP; a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (*PUC-Rio*); a Universidade Federal do Paraná (*UFPR*); a Universidade Federal de Juiz de Fora (*UFJF*) e a Universidade Federal de Santa Catarina (*UFSC*). No entanto, independente do modelo desenvolvido por cada um desses grupos, o bom desempenho e a confiabilidade dos mesmos depende da qualidade das informações por eles manipuladas.

A carência de artigos publicados na área de consolidação de dados deixa claro que, até poucos anos atrás, não havia interesse em divulgar ações desenvolvidas no sentido de melhorar as informações do SEB. Os três trabalhos citados na sequência não estão diretamente relacionados com o planejamento da operação energética, porém enfatizam a importância de dados consistentes na área de hidrologia.

Oliveira e Canellas (1999) destacam a importância de dados hidrometeorológicos confiáveis no gerenciamento de recursos hídricos. Esse trabalho apresenta a experiência de FURNAS na instalação de postos hidrometeorológicos convencionais e telemétricos, serviços de hidrometria, monitoramento e previsão de vazões a tempo real.

Rodrigues (2002), em sua dissertação de mestrado, propõe um sistema de controle de qualidade *on-line* de dados hidrológicos teletransmitidos para validar e consolidar os dados das estações telemétricas da ANA instaladas na bacia do rio Tocantins. Ele destaca que a pré-análise dos dados é fundamental para que se alcance o objetivo de uma base de dados sólida e confiável.

NWS (2002), citado por Rodrigues (2002), escreve: “Nenhum programa da área de hidrologia poderá ter sucesso se os dados básicos forem imprecisos”. Ele também afirma que a qualidade dos dados afeta diretamente a qualidade das previsões e avisos hidrometeorológicos.

As próximas citações demonstram o interesse e as ações iniciais na busca por informações consistentes relacionadas à operação de sistemas hidrelétricos.

Lopes (2001), em sua dissertação de mestrado, sugere, como um dos itens da lista de trabalhos futuros, a melhoria da qualidade dos dados das usinas hidrelétricas e das séries hidrológicas.

Lopes (2003) comenta que problemas na qualidade dos dados utilizados pelo SEB podem super-estimar a energia disponível no SIN. Nesse mesmo trabalho, ele conclui: “Tanto quanto discutir alternativas de modelagem é urgente consolidar os dados utilizados para melhorar a representatividade das usinas. Analisar metodologia separadamente do detalhamento e qualidade dos dados é uma grande falha, pois os técnicos que desenvolvem a metodologia é que conhecem os requisitos dos dados”.

Segundo Lopes (2007), “A falta de uma base de dados única e consistida para o setor elétrico nacional é permanente fonte de problemas”. Nesse trabalho, Lopes faz uma análise crítica da qualidade dos dados de um dos arquivos de entrada dos modelos NEWAVE e DECOMP. Além disso, ele relaciona os dados que influenciam significativamente nos resultados dos modelos utilizados no planejamento da operação energética.

Diniz (2007) estuda dois modelos matemáticos para a representação do rendimento de unidades geradoras de usinas hidrelétricas. Para encontrar os coeficientes dos modelos, ele usa uma técnica de regressão linear sobre os pontos de uma curva colina.

Hidalgo et al. (2009a) descreve o gerenciador de dados HydroData e o construtor de consultas HydroConsulta com foco na análise crítica dos dados envolvidos no planejamento e na programação da operação energética. Esse artigo também apresenta uma correção no polinômio do canal de fuga de uma usina hidrelétrica brasileira do SIN usando simultaneamente o HydroData, o HydroConsulta e a ferramenta *Linha de Tendência* do Excel.

Hidalgo et al. (2009b) analisa seis funções que influenciam no planejamento da operação hidrelétrica. Para isso são usados o HydroData, o HydroConsulta e o simulador da operação de usinas hidrelétricas HydroSim CP. Esse artigo mostra que, embora cada um desses módulos tenha um objetivo específico, todos eles podem ser usados como ferramenta para avaliação de consistência de dados.

Hidalgo et al. (2009c) explora duas aplicações do HydroSim CP, como ferramenta para análise de dados de usinas hidrelétricas. A primeira aplicação tem como objetivo a reprodução da trajetória de vazão turbinada registrada pela usina. A segunda tem como meta a reprodução da trajetória de geração verificada. As vantagens e desvantagens de cada aplicação são discutidas nesse artigo.

Hidalgo et al. (2009d) descreve uma sequência de procedimentos para a consolidação de dados de usinas hidrelétricas brasileiras. Os procedimentos descritos fazem uso das informações registradas pela usina. A técnica é aplicada a uma usina que faz parte do SIN e é avaliada usando o HydroSim CP.

Hidalgo et al. (2009e) analisa o impacto da qualidade dos dados de usinas hidrelétricas na reprodução da operação. Essa análise é feita usando o HydroSim LP. Ainda nesse artigo, compara-se o uso do rendimento global médio e variável em dados de operação de médio prazo.

Além dos trabalhos citados acima, a seguir são apresentados resumos de duas matérias publicadas no portal *CanalEnergia*, que destacam ações do CNPE e da ANEEL na tentativa de assegurar a confiabilidade dos métodos e dos dados utilizados no setor elétrico.

- O CNPE, preocupado com a adequação e eficácia dos métodos adotados para o planejamento e a operação energética, publicou no Diário Oficial de 09/05/2007 a resolução nº 1 (DO, 2007). Esta resolução estabelece diretrizes visando garantir a coerência e a integração das metodologias e dos programas computacionais utilizados pelo MME, pela EPE, pelo ONS e pela CCEE (CANAL_ENERGIA, 2007).
- Em 19/05/2009 a ANEEL aprovou uma resolução normativa, segundo a qual, o ONS deve contratar uma empresa de auditoria para verificação dos dados de entrada do Programa Mensal de Operação Eletroenergética e suas revisões. A medida foi motivada por conta da elevação do preço da energia, em junho de 2007, sem que

houvesse mudanças significativas nos dados de demanda e oferta futura de energia. Essa auditoria fornece à ANEEL mecanismos de fiscalização dos dados, como forma de evitar distorções nos preços da energia. Essa ação está prevista pelo decreto 5.081/2004 (CANAL_ENERGIA, 2009).

1.4 Objetivo da Tese e Organização do Trabalho

O objetivo deste trabalho é apresentar ferramentas que permitem uma visão crítica da qualidade dos dados do setor elétrico e registrar uma metodologia, baseada em procedimentos, para a consolidação de dados de usinas hidrelétricas.

Inicialmente, no Capítulo 2, detalha-se a equação de balanço hídrico, a função de produção hidrelétrica, os dados físicos, o conceito de rendimento global e as variáveis de operação envolvidas no planejamento da operação energética. Além disso, apresenta-se o cenário atual da qualidade dos dados do SEB.

No Capítulo 3 são descritas as três ferramentas utilizadas como apoio à aplicação da metodologia de consolidação dos dados: o HydroData, o HydroConsulta e o HydroSim. O foco para elas é a análise crítica da qualidade dos dados.

A metodologia de consolidação de dados encontra-se no Capítulo 4. Ela é apresentada em duas etapas: análise da coerência da base de dados e consolidação efetiva das funções que representam as características físicas da usina.

No Capítulo 5, aplica-se a metodologia proposta a uma usina hidrelétrica que faz parte do SIN e cuja operação está sob a coordenação e controle do ONS. Nesse capítulo, seis funções utilizadas no planejamento e na programação hidrelétrica são consolidadas.

Para avaliar o desempenho da metodologia proposta e analisar o impacto da qualidade dos dados para o modelo HydroSim, no Capítulo 6, apresentam-se estudos de reprodução da operação para o curtíssimo e curto prazo.

Por fim, no Capítulo 7 são pontuadas as conclusões, observações e as sugestões de trabalhos futuros associados a esse tema.

Capítulo 2

Componentes do Problema

Neste capítulo são apresentadas as principais informações envolvidas na operação de usinas hidrelétricas. Inicialmente, são detalhadas a equação de balanço hídrico e a função de produção. Em seguida, são definidos os dados físicos, o conceito de rendimento global e as variáveis de operação. Por fim, as características dos dados do SEB são exploradas com ênfase para o arquivo “Hidr.dat”.

2.1 Equação de Balanço Hídrico e Função de Produção Hidrelétrica

Para compreensão das principais variáveis que compõem os modelos hidráulicos, na Figura 2.1, apresenta-se um esquema de uma usina hidrelétrica.

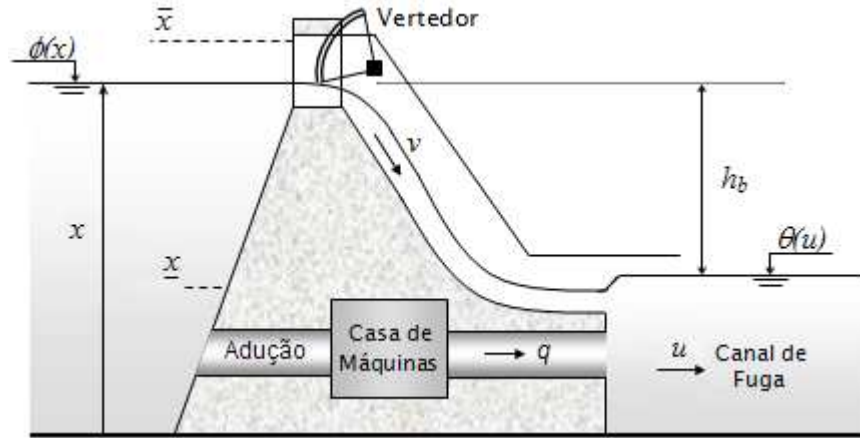


Figura 2.1 Esquema e principais variáveis de uma usina hidrelétrica (CICOGNA, 2003).

onde:

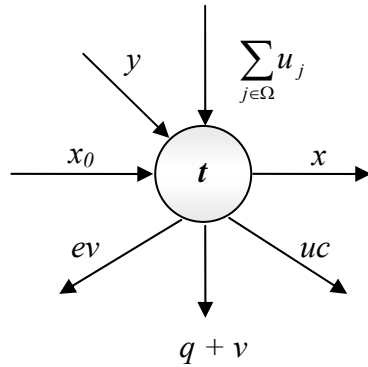
- x é o volume do reservatório [hm^3];
- $\bar{x}$ é o volume máximo operativo do reservatório [hm^3];
- $\underline{x}$ é o volume mínimo operativo do reservatório [hm^3];
- $x_{\text{útil}}$ é o volume útil do reservatório, $\bar{x} - \underline{x}$, [hm^3];
- q é a vazão turbinada pela casa de máquinas (engolimento) [m^3/s];
- v é a vazão descarregada pelo vertedor (vertimento) [m^3/s];
- u é a vazão descarregada pela usina, $q + v$, (defluência) [m^3/s];
- $\phi(x)$ é a cota de montante do reservatório (função do volume) [m];
- $\theta(u)$ é a cota de jusante do canal de fuga (função da defluência) [m];
- h_b é a altura de queda bruta, $\phi(x) - \theta(u)$, [m].

Dentre as várias fórmulas e funções que fazem parte do problema de planeamento da operação de sistemas hidrotérmicos, duas serão focos deste trabalho: a *equação de balanço hídrico* e a *função de produção hidrelétrica*.

Equação de Balanço Hídrico

O cálculo de conservação de água dos reservatórios é chamado *balanço hídrico*. Ele determina o volume final do reservatório a partir do volume inicial e das variáveis que alteram o nível de armazenamento. Para efeito de análise de dados e implementação de algoritmos, a equação de balanço pode ser representada como uma rede de nós e arcos. Cada nó representa o comportamento da usina hidrelétrica durante um intervalo de tempo. Os arcos simbolizam as variáveis que aumentam ou diminuem o volume do reservatório.

Na Figura 2.2, representa-se graficamente a equação de balanço hídrico a partir da definição de nós e arcos. A Equação 2.1 corresponde a sua forma escrita.



$$x = x_0 + \left(y + \sum_{j \in \Omega} u_j - (q + v + ev + uc) \right) \cdot \frac{\Delta t}{10^6}$$

Figura 2.2 Representação gráfica da equação de balanço hídrico.

Equação 2.1 Representação escrita da equação de balanço hídrico.

onde:

- x_0 é o volume do reservatório no início da operação do intervalo [hm³];
- y é a vazão afluyente incremental à usina durante o intervalo [m³/s];
- Ω é o conjunto das usinas imediatamente à montante da usina considerada;
- ev é a evaporação líquida do reservatório, isto é, a diferença entre a evaporação do reservatório e a evapotranspiração da área antes do alagamento, durante o intervalo [m³/s];
- uc é o uso consuntivo do reservatório e na bacia incremental da usina durante o intervalo [m³/s];
- Δt é a duração do intervalo [s]. A fração $\Delta t / 10^6$ é um fator de conversão de unidades de vazão [m³/s] para volume [hm³].

Três considerações devem ser feitas para essa equação:

1. Independente do tamanho do horizonte de estudo, os volumes utilizados nessa equação são sempre instantâneos e as vazões são sempre médias para o intervalo.
2. Para o curtíssimo prazo, em geral, são utilizadas as vazões afluentes registradas na base de dados de operação, calculadas por balanço hídrico. No curto e no médio prazo, considera-se o histórico de vazões naturais médias semanais e mensais resultantes da agregação das vazões horárias.
3. O efeito de *routing*, translação no tempo das vazões defluentes das usinas imediatamente à montante, deve ser considerado no curtíssimo prazo. Já no curto e no médio prazo, esse efeito pode ser desprezado porque o tempo de viagem é inferior à duração dos intervalos do horizonte de estudo.

Função de Produção Hidrelétrica

A função de produção determina a potência p , obtida a partir de uma usina com o seu reservatório armazenando um volume x , suas turbinas engolindo uma vazão q e a usina defluindo uma vazão u , que pode ser diferente de q caso exista vertimento v .

$$p = k \cdot \eta_g \cdot \eta_t \cdot [\phi(x) - \theta(u) - h_p] \cdot q \quad (2.2)$$

onde:

- p é a potência obtida no processo de conversão da energia potencial em energia elétrica [MW médio];
- k é a constante de aceleração da gravidade, multiplicada pela massa específica da água e dividida por 10^6 . Seu valor é 0,00981 [MW/(m³/s)/m];
- $\eta_g \cdot \eta_t$ é o rendimento do conjunto turbina/gerador no processo de conversão da energia mecânica em energia elétrica;
- h_p é a perda de carga hidráulica que a água sofre no canal de adução, desde o reservatório até as turbinas. Essa perda deve ser descrita como uma função da vazão turbinada [m].

Para essa função, também três considerações são importantes:

1. Independente do tamanho do horizonte de estudo, todas as variáveis dessa função são valores médios para o intervalo.
2. Em geral, no curtíssimo prazo, considera-se um rendimento variável para os conjuntos turbina/gerador, pois o despacho de geração pode ser individualizado por máquina. Já no curto e médio prazo, costuma-se usar um rendimento médio constante η_{med} , pois o despacho é por usina.
3. Denomina-se altura de queda líquida h_l a diferença entre a altura de queda bruta e a perda hidráulica, ou seja, $h_l = \phi(x) - \theta(u) - h_p$. Define-se como produtividade da usina a relação p / q . Com o valor do rendimento médio, pode-se calcular a produtibilidade específica da usina pelo produto $k.\eta_{med}$.

2.2 Dados Físicos e Conceito de Rendimento Global

Dados físicos são aqueles que não variam com a operação da usina. Nesse trabalho, esse termo refere-se às funções que descrevem as características físicas da usina. Estas funções são detalhadas na sequência.

Polinômio Área x Cota

A área de um reservatório é função da cota do nível d'água de montante. Costuma-se utilizar polinômios para representar essa função. O ajuste desse polinômio é feito a partir dos pares de pontos “área x cota”, obtidos em estudos topográficos da região alagada pela construção da barragem. Na Figura 2.3, apresenta-se o gráfico do polinômio área x cota do reservatório da usina de Emborcação.

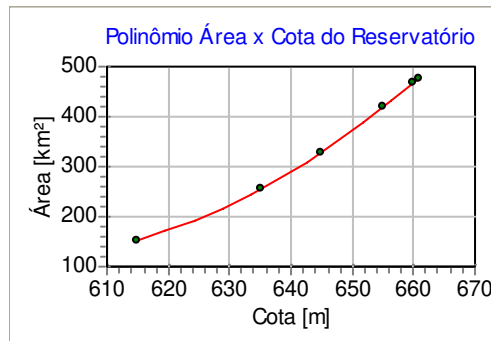


Figura 2.3 Polinômio área [km²] x cota [m] para a usina Emborcação (CCEE, 2009).

Polinômio Cota x Volume

A cota do nível d'água de montante é função do volume armazenado no reservatório. Os pares de pontos “cota x volume” podem ser calculados a partir da integração dos pontos “área x cota”. Aos pares “cota x volume” são ajustados polinômios.

Na Figura 2.4, mostra-se o gráfico do polinômio cota x volume da usina Emborcação. O polinômio dessa figura foi ajustado para valores de volume variando entre o limite mínimo e máximo operativo.

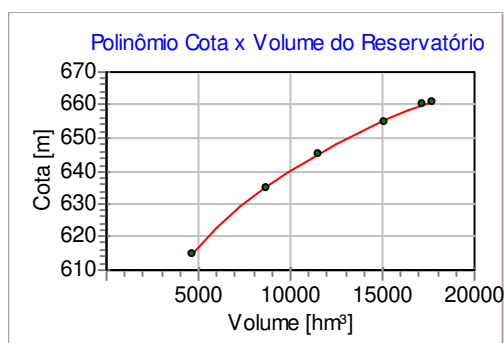


Figura 2.4 Polinômio cota [m] x volume [hm³] para a usina Emborcação (CCEE, 2009).

Polinômio Cota de Jusante x Defluência

A cota do nível d'água de jusante é função da vazão defluente. Em geral, essa função também é representada por polinômios. Para algumas usinas hidrelétricas, a elevação do canal de fuga também depende do remanso na confluência de rios ou do reservatório da usina imediatamente à jusante (efeito de *afogamento* do canal de fuga, CICOGNA, 1999). Nesse caso, a representação do canal de fuga por um único polinômio se torna complexa.

Na Figura 2.5, apresenta-se o gráfico do polinômio cota de jusante x defluência da usina de Emborcação. Os limites de validade da vazão defluente foram baseados nos valores encontrados no histórico de vazões naturais médias mensais.

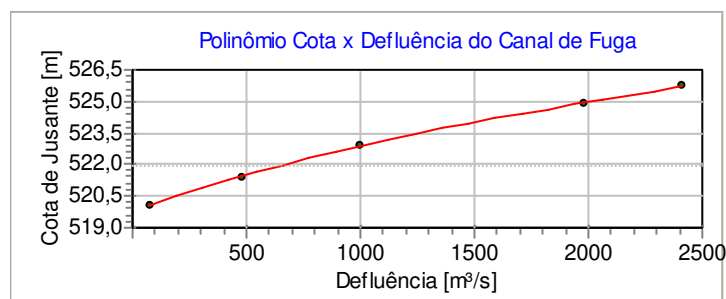


Figura 2.5 Polinômio do canal de fuga para a usina Emborcação (CCEE, 2009).

Função de Potência Máxima

A potência máxima de uma unidade geradora é definida como o maior valor de potência ativa que pode ser produzida para uma determinada altura de queda, levando-se em conta as limitações da turbina e do gerador.

Na Figura 2.6, mostra-se o gráfico da função de potência máxima para a usina de Chavantes. Essa função relaciona potência máxima e altura queda bruta.

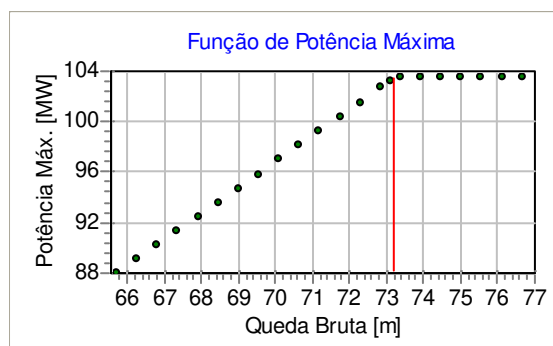


Figura 2.6 Função de potência máxima para a usina Chavantes (Fonte: DUKE).

Vê-se que a produção de potência máxima tem dois comportamentos distintos, e que o ponto divisor dos dois comportamentos é o valor de altura de queda efetiva h_{ef} , 73,2 m. A operação para alturas de queda menores do que a queda efetiva faz com que a produção de potência elétrica fique limitada pela turbina. Para tais quedas, a potência mecânica máxima produzida pela turbina é inferior a capacidade do gerador, 103,5 MW. Por outro lado, na operação em condições de queda superior à queda efetiva, a turbina é capaz de produzir potências mecânicas superiores àquela que o gerador pode absorver em seu eixo. Para diminuir a potência mecânica transferida ao gerador, a turbina tem seus distribuidores parcialmente fechados, o que reduz seu engolimento máximo.

Função de Engolimento Máximo

O engolimento máximo de uma unidade geradora é definido como a vazão turbinada que, numa dada altura de queda, produz a potência máxima da unidade.

Na Figura 2.7, apresenta-se o gráfico da função de engolimento máximo para a usina de Chavantes. Essa função relaciona engolimento máximo e altura queda bruta. Ela também tem dois comportamentos distintos, divididos pela altura de queda efetiva.

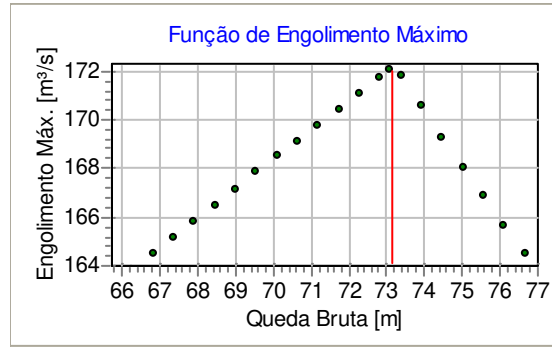


Figura 2.7 Função de engolimento máximo para a usina Chavantes (Fonte: DUKE).

Nota-se que, para uma altura de queda menor do que a queda efetiva, a unidade geradora tem um engolimento máximo menor que seu engolimento efetivo q_{ef} , 172 m³/s, mesmo com o distribuidor totalmente aberto. Porém, para uma altura de queda maior do que a queda efetiva, a unidade geradora atinge sua potência efetiva e o distribuidor precisa ser gradualmente fechado para não danificar o gerador. Dessa forma, novamente o engolimento máximo é menor do que o engolimento efetivo, pois o gerador não pode receber toda a potência disponível na turbina. Isso significa que, para quedas maiores que a queda efetiva, a unidade geradora produz sua potência efetiva e economiza água do reservatório, pois o engolimento máximo necessário é menor quanto maior for a queda líquida.

Função de Perda de Carga Hidráulica

A função de perda de carga hidráulica h_p representa a perda, em metros, que a água sofre pelo percurso no canal de adução desde o reservatório até as turbinas. Essas perdas ocorrem, principalmente, pelo atrito entre a água e as paredes da tubulação. Nos modelos adotados pelo SEB, existem duas representações aproximadas e uma que melhor representa o efeito físico dessa perda, conforme a Equação 2.3.

$$h_p = \begin{cases} c_1 \cdot h_b & \swarrow \text{aproximadas} \\ c_2 & \searrow \\ c_3 \cdot q^2 & \longleftarrow \text{melhor representa o efeito físico} \end{cases} \quad (2.3)$$

A primeira representação considera a perda hidráulica com uma porcentagem c_1 da altura de queda bruta h_b da usina. A segunda utiliza um valor constante c_2 . A terceira forma

de representar a perda hidráulica emprega uma constante c_3 multiplicada pelo quadrado da vazão turbinada q^2 .

Função de Rendimento do Gerador

Numa unidade geradora, o processo de transformação da energia mecânica em energia elétrica está sujeito ao rendimento das máquinas envolvidas na operação. No gerador ocorrem perdas por atrito mecânico e produção de calor. O rendimento do gerador η_g é uma função da potência gerada. Entretanto, quase todas as usinas do sistema brasileiro adotam um valor constante para esse rendimento.

Na Figura 2.8, mostra-se a função de rendimento de um gerador da usina de Itaipu.

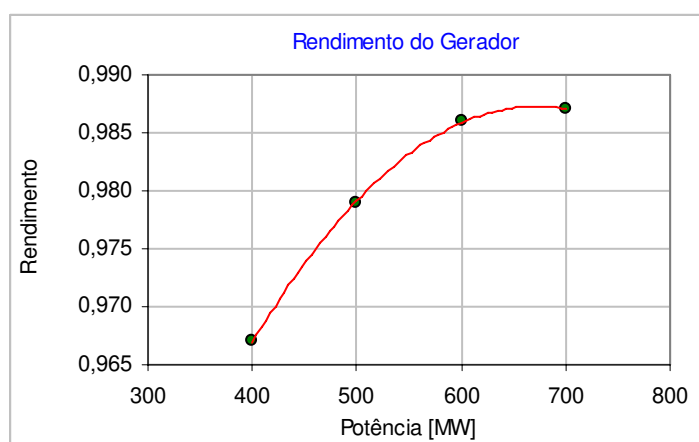


Figura 2.8 Função de rendimento de um gerador da usina de Itaipu (ARCE, 2006).

Função de Rendimento da Turbina

O rendimento da turbina η_t pode ser expresso como uma função da queda bruta ou líquida pela potência ou vazão turbinada. Em geral, essa função é fornecida pelo fabricante da turbina de acordo com ensaios de laboratório em modelos reduzidos. Devido a sua forma, a função de rendimento da turbina também é chamada de *Curva Colina*.

Na Figura 2.9, apresenta-se a função de rendimento de uma unidade geradora (Turbina tipo *Francis*) da usina Manso. O rendimento, nessa figura, é função da altura de queda bruta disponível e da potência. Para ilustração do processo de cálculo do rendimento de uma unidade geradora, na Figura 2.10, mostra-se a função de rendimento em curvas de nível, ou seja, curvas que possuem igual rendimento.

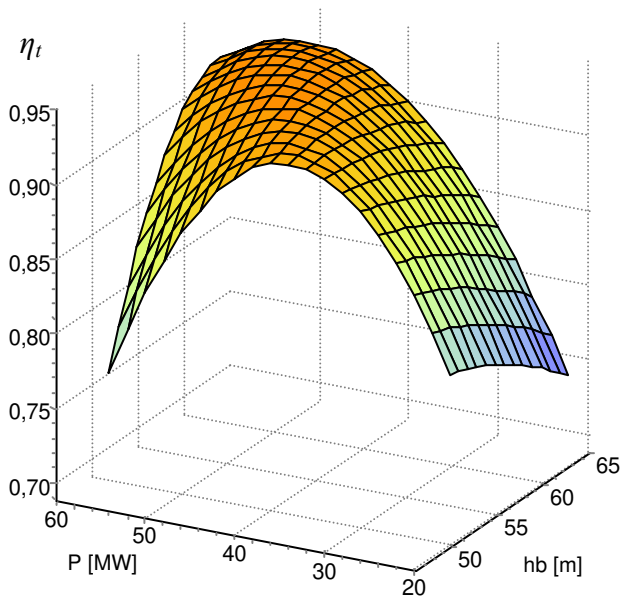


Figura 2.9 Função de rendimento da turbina de uma unidade geradora de Manso - Curva Colina (Fonte: FURNAS).

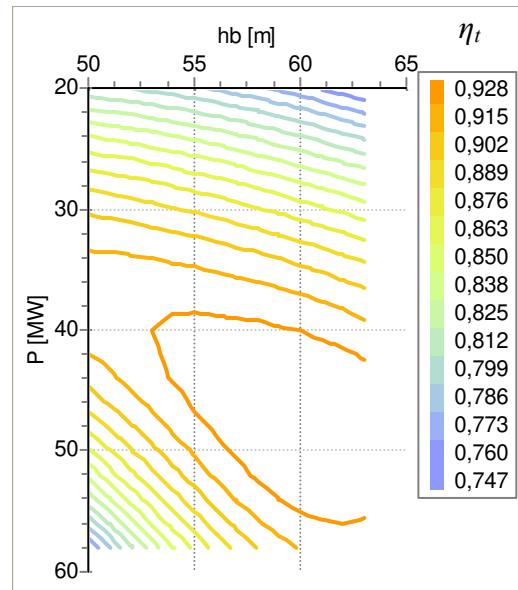


Figura 2.10 Representação da Curva Colina na forma de curvas de igual rendimento - Curvas de Nível.

Conceito de Rendimento Global

O rendimento global η^G de uma usina engloba o rendimento dos geradores, das turbinas e as perdas nos circuitos hidráulicos, conforme apresentado na Figura 2.11.

$$p = k.(\eta_g.\eta_t).[\phi(x) - \theta(u) - h_p].q$$

$$p = k.\eta^G.[\phi(x) - \theta(u)].q$$

Figura 2.11 Função de produção, Equação 2.2, usando o conceito de rendimento global.

O uso do rendimento global apresenta três características. A primeira é que ele simplifica a função de produção, pois esta torna-se dependente da queda bruta ao invés da líquida. A segunda característica é que ele não compromete o registro de operação da usina, pois as informações por ele simplificadas, em geral, não são armazenadas na base de dados de operação. A terceira é que mesmo os modelos que fazem uso separadamente do rendimento do gerador, da turbina e da perda hidráulica podem aderir ao conceito de rendimento global. Para isso, devem ser feitas duas ações:

1. Atribuir o valor “1” para o rendimento constante do gerador e “0” para a constante de perda hidráulica. Isso neutraliza tais elementos na equação de produção.
2. Substituir a matriz de rendimento da turbina pela matriz de rendimento global. Dessa forma, uma única matriz se responsabiliza por todas as perdas envolvidas no processo.

No Capítulo 4 serão fornecidos detalhes sobre o método de obtenção e calibração da matriz de rendimento global de uma usina.

2.3 Dados de Operação

Nesta seção são descritos os dados de operação envolvidos no cálculo da equação de balanço hídrico e da função de produção hidrelétrica. Os dados de operação variam com o intervalo de tempo, são exemplos: nível de montante e de jusante; volume do reservatório; vazão afluente, turbinada e vertida; potência gerada; evaporação líquida do reservatório; perda hidráulica e rendimento do conjunto turbina/gerador. Esses dados podem ser medidos, direta ou indiretamente, ou calculados.

Nível de Montante e de Jusante

O nível d'água imediatamente à montante de um aproveitamento hidrelétrico, em geral, é medido nas proximidades da barragem. O nível d'água imediatamente à jusante de um aproveitamento hidrelétrico é, comumente, medido no canal de fuga da usina. A medição desses níveis é direta e com precisão de centímetros. As leituras podem ser realizadas em pequenos intervalos de tempo, como por exemplo: cinco segundos. Porém, para o registro na base de dados é calculada a média dos valores acumulados a cada meia ou uma hora.

Volume do Reservatório

Com o valor medido do nível de montante, obtém-se o volume do reservatório usando a função inversa do polinômio cota x volume, que relaciona essas duas variáveis.

Vazão Afluente

A vazão que chega a uma usina hidrelétrica é calcula por balanço hídrico, ou seja, pela soma da variação do reservatório com a vazão defluente, no período considerado. Esse

cálculo utiliza o polinômio cota x volume para transformar nível em volume. No entanto, os estudos de curto e médio prazo consideram o histórico de vazões naturais médias mensais, fornecido pelo SEB. Esse histórico contém as vazões que ocorreriam em uma seção do rio se não houvesse a regularização de reservatórios à montante e outros impactos da intervenção humana, como o uso de água para irrigação.

Vazão Turbinada

A vazão que passa pelas turbinas de uma usina hidrelétrica para fins de geração de energia é calculada em função da potência gerada, da altura de queda bruta e do rendimento das máquinas. Costuma-se utilizar uma tabela definida de acordo com o método iterativo apresentado no algoritmo da Figura 2.12 (CNEC, 1983/91). Essa tabela estabelece a relação potência, queda bruta e vazão turbinada.

Segundo o algoritmo, o cálculo da tabela utiliza as funções de rendimento do gerador, da turbina e perda hidráulica. Para cada uma das possíveis combinações de potência e queda bruta, estima-se um valor de vazão turbinada inicial. Com esse valor estimado, calcula-se a perda hidráulica e, na sequência, a queda líquida. A fim de encontrar o valor de rendimento da turbina, faz-se uma interpolação linear dupla na matriz de rendimento da turbina. Em seguida, é calculada a vazão turbinada em função da potência gerada, da altura de queda líquida e do rendimento das máquinas. A vazão turbinada calculada q^* é comparada com a estimada. Se a diferença entre elas, em módulo, é menor do que a tolerância ξ significa que uma relação potência x queda bruta x vazão turbinada foi encontrada. Caso contrário, a vazão turbinada estimada recebe o valor da calculada e o processo recomeça. Após percorrer todos os pares de potência x queda-bruta da usina, o algoritmo se encerra.

Atualmente, com o objetivo de melhorar essa informação, alguns agentes do SEB estão iniciando campanhas de medição de vazões utilizando a tecnologia *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)*. O ADCP utiliza técnicas de sensoriamento remoto através do efeito *Doppler*. O funcionamento básico do ADCP consiste em emitir pulsos acústicos ao longo de feixes estreitos em uma frequência conhecida. A diferença das frequências dos sons emitidos e refletidos é proporcional à velocidade relativa entre o barco e as partículas imersas na água. A suposição básica desse método é que as partículas dissolvidas na água se deslocam com a mesma velocidade do fluxo (GAMARO, 2006).

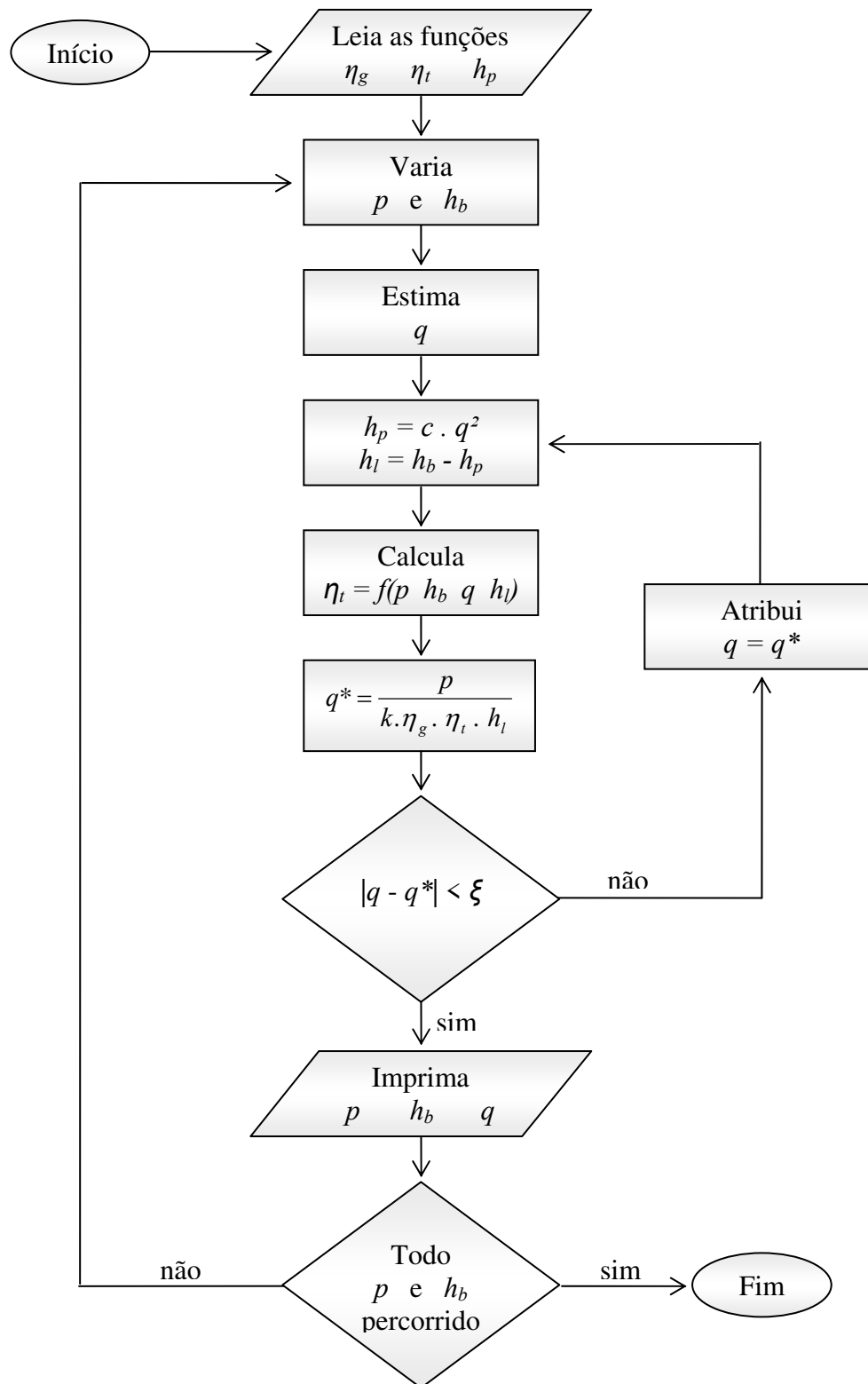


Figura 2.12 Algoritmo de cálculo para obtenção da tabela que relaciona potência x queda bruta x vazão turbinada (CNEC, 1983/91).

Vazão Vertida

A vazão liberada por um reservatório através de vertedouros de superfície e/ou descarregadores de fundo pode ser calculada. Para isso, utiliza-se uma tabela obtida dos ensaios em modelo reduzido que relaciona a vazão vertida com uma combinação dos seguintes parâmetros: geometria e tipo do vertedouro, carga hidráulica, e abertura da comporta ou da válvula.

Potência Gerada

A potência gerada é a energia produzida, por unidade de tempo, num conjunto turbina/gerador. Ela é aferida de forma indireta, pois mede-se a indução de corrente elétrica na bobina que envolve o cabo por onde passam os elétrons. Em geral, a potência também é medida em escalas pequenas de tempo. Porém, faz-se o registro do valor médio acumulado a cada meia ou uma hora.

Evaporação Líquida do Reservatório

A informação de evaporação líquida é utilizada nos estudos de simulação da operação energética e na obtenção das séries de vazões naturais nos locais de aproveitamentos hidrelétricos. Ela corresponde à diferença entre a evaporação real do reservatório e a evapotranspiração real da bacia hidrográfica no local do reservatório antes da sua implantação. A evaporação líquida é função da área alagada pela construção da barragem. A área do aproveitamento é obtida do polinômio área $\times$ cota. O valor da área deve ser multiplicado pelo coeficiente de evaporação média do reservatório. A fim de converter a unidade de medida de volume em vazão, dividi-se esse produto pelo intervalo de tempo (ONS, 2004).

Perda Hidráulica

A perda de carga ao longo da tubulação é afetada pela rugosidade da superfície interna do conduto e pelo regime de vazão, que pode ser laminar ou turbulento. O cálculo dessa variável depende da função de perda hidráulica. A representação mais precisa dessa função utiliza uma constante multiplicada pelo quadrado da vazão turbinada, conforme Seção 2.2, pois a perda de carga é proporcional à energia cinética da água em escoamento.

Rendimento do Conjunto Turbina/Gerador

O rendimento das máquinas depende do rendimento do gerador, considerado constante no SEB, e da função de rendimento da turbina, que relaciona queda bruta ou líquida com potência ou vazão turbinada.

Observando a descrição dos dados de operação, percebe-se que apenas os níveis de montante e de jusante são medidos diretamente e que somente a potência gerada é medida indiretamente. Todas as demais variáveis são calculadas e dependem dos dados físicos.

2.4 Características dos Dados do Setor Elétrico Brasileiro

O ONS disponibiliza em seu *site* um conjunto de arquivos denominado *Procedimentos de Rede*. Estes arquivos são documentos de caráter normativo elaborados pelo ONS com a participação dos agentes e aprovados pela ANEEL. Eles definem os procedimentos e os requisitos necessários à realização das atividades de planejamento da operação eletroenergética, administração da transmissão, programação e operação em tempo real no âmbito do SIN.

Segundo o procedimento 8, *Programação Diária da Operação Eletroenergética* (ONS, 2008), a responsabilidade dos dados é dos agentes de geração e, cabe ao ONS receber, consistir e consolidar os dados, interagindo com os agentes quando da verificação de inconsistências e/ou alterações.

Conforme mencionado no Capítulo 1, os modelos NEWAVE e DECOMP utilizados pelo SEB são executados pelo menos uma vez por mês por ocasião do PMO. Os dados de entrada desses *softwares* encontram-se num conjunto de mais de trinta arquivos textos e binários. Estes arquivos são alterados periodicamente e encontram-se disponíveis no *site* da CCEE (CCEE, 2009). Dentre os arquivos de entrada do conjunto NEWAVE/DECOMP, destaca-se: o “Hidr.dat”.

O “Hidr.dat” contém os dados cadastrais das usinas hidrelétricas que fazem parte do SIN. Entre as informações nele armazenadas podem ser citadas: código e nome da usina; sistema e empresa a qual ela pertence; usina à jusante; volume e cota mínimos e máximos operativos; coeficientes dos polinômios área x cota, cota x volume e cota de jusante x

defluência; coeficiente de evaporação média mensal; produtividade específica; número de máquinas; tipo e constante de perda hidráulica; potência, vazão e queda efetiva de cada máquina.

O *software* que permite a visualização dos dados do “Hidr.dat” possui acesso restrito. Portanto, para apresentação neste trabalho, o arquivo binário foi convertido para um arquivo de extensão *csv* compatível com a planilha eletrônica Excel, conforme ilustrado na Figura 2.13.



	A	B	C	D	E	F
	CodUsina	Usina	Sistema	Empresa	Posto	Jusante
1	1	CAMARGOS	1 - Sudeste	18 - Cemig	1	2 - ITUTINGA
2	2	ITUTINGA	1 - Sudeste	18 - Cemig	2	4 - FUNIL-GRANDE
3	4	FUNIL-GRANDE	1 - Sudeste	18 - Cemig	211	6 - FURNAS
4	6	FURNAS	1 - Sudeste	19 - Furnas	6	7 - M. DE MORAES
5	7	M. DE MORAES	1 - Sudeste	19 - Furnas	7	8 - ESTREITO
6	8	ESTREITO	1 - Sudeste	19 - Furnas	8	9 - JAGUARA
7	9	JAGUARA	1 - Sudeste	18 - Cemig	9	10 - IGARAPAVA
8	10	IGARAPAVA	1 - Sudeste	18 - Cemig	10	11 - VOLTA GRANDE
9	11	VOLTA GRANDE	1 - Sudeste	18 - Cemig	11	12 - P. COLOMBIA
10	12	P. COLOMBIA	1 - Sudeste	19 - Furnas	12	17 - MARIMBONDO

Figura 2.13 Apresentação dos dados do arquivo “Hidr.dat” de abril de 2009, utilizando o Excel.

Na Figura 2.13, apresenta-se uma parte da planilha, que contém 192 linhas e 180 colunas, com os dados do arquivo “Hidr.dat” atualizado em abril de 2009. Nota-se que, todos os dados relacionados às usinas são apresentados em forma de tabela única. Dessa maneira, dados comuns a várias usinas são repetidos sem necessidade. Isso acontece, por exemplo, com os dados da coluna *Sistema* da Figura 2.13. Essa repetição desnecessária de dados induz ao erro e pode ser evitada utilizando o conceito de Banco de Dados Relacional (BDR) (HIDALGO, 2004).

Neste trabalho, fez-se uma análise do “Hidr.dat” em relação aos dados físicos que possuem maior influência no planejamento da operação hidrelétrica. Os aproveitamentos desse arquivo foram classificados conforme a capacidade de regularização dos seus reservatórios como: *usinas de acumulação* ou *usinas de compensação*. O reservatório das usinas de acumulação tem grande capacidade de armazenar energia em forma de água, por

isso são responsáveis pela regulação da vazão dos rios. O reservatório das usinas de compensação tem pequena capacidade de armazenar energia, o que permite apenas a regulação de pequenas descargas. Foram consideradas usinas de acumulação aquelas cuja diferença entre o volume máximo e mínimo é maior que 10 hm³. As usinas *fictícias* não foram avaliadas, pois não existem fisicamente, são criadas para adequação à metodologia utilizada pelos modelos do SEB.

É importante lembrar que os modelos NEWAVE/DECOMP referem-se aos horizontes de médio e curto prazo, por isso o arquivo “Hidr.dat” não contém informações como, por exemplo, rendimento variável das máquinas. Embora esse arquivo possua colunas para armazenar os coeficientes das funções de potência máxima e engolimento máximo, não existem valores para esses campos. O conjunto de usinas analisadas compõe os aproveitamentos em operação e os aproveitamentos pertencentes ao planejamento de expansão dos próximos cinco anos.

Na Tabela 2.1, apresenta-se o resultado da análise dividida em quatro etapas. Na primeira, quantificou-se o número de usinas que não possuem uma representação para a variação dos polinômios área $\times$ cota, cota $\times$ volume e cota de jusante $\times$ defluência. Na segunda o foco foi o tipo de representação da perda de carga hidráulica. Na terceira, procurou-se por aproveitamentos cujo rendimento médio, embutido na produtividade específica, é um valor muito baixo ou muito alto. Na quarta e última etapa, investigou-se o número de usinas que não possuem uma representação para o efeito de evaporação do reservatório.

Tabela 2.1 Análise dos dados do arquivo “Hidr.dat” de abril de 2009.

Dado Físico		Todas as usinas (178)		Usinas de acumulação (76)		Usinas de compensação (102)	
		#	%	#	%	#	%
Polinômio Constante	área $\times$ cota	86	48,3	4	5,3	82	80,4
	cota $\times$ volume	84	47,2	2	2,6	82	80,4
	cota $\times$ defluência	32	18,0	11	14,5	21	20,6
Perda Hidráulica	c_1	64	36,0	30	39,5	34	33,3
	$c_2 \cdot h_b$	114	64,0	46	60,5	68	66,7
	$c_3 \cdot q^2$	0	0	0	0	0	0
Rendimento Médio	$\eta_{med} < 78\%$	14	7,9	5	6,6	9	8,8
	$\eta_{med} > 95\%$	0	0	0	0	0	0
Evaporação não informada		15	8,4	1	1,3	14	13,7

Observando a Tabela 2.1, pode-se verificar que muitas usinas usam um polinômio constante para as representações do reservatório e do canal de fuga. A maior parte delas são usinas com reservatório de compensação. Essa simplificação do polinômio área $\times$ cota pode ocasionar problemas no cálculo da evaporação. Para os polinômios cota $\times$ volume e cota de jusante $\times$ defluência essa simplificação implica em diferenças no cálculo da altura de queda.

Em relação ao tipo de perda hidráulica, segundo os dados do arquivo “Hidr.dat”, nenhuma usina do SIN faz uso da forma que melhor representa o efeito físico das perdas. A maior parte dos aproveitamentos considera a perda hidráulica como uma porcentagem da queda bruta.

Algumas usinas do SIN têm o valor de rendimento médio, embutido na produtibilidade específica, igual a zero. Com exceção dos valores nulos, o menor valor de rendimento médio encontrado foi de 79%. O maior valor listado foi de 94%.

Quase todas as usinas com reservatório de acumulação possuem valores médios mensais de evaporação. No entanto, 13,7 % das usinas com reservatórios de compensação consideram evaporação líquida igual a zero. Isso pode subestimar as perdas no balanço hídrico.

Uma análise mais detalhada do “Hidr.dat” mostra que nem todos os polinômios que não são constantes possuem uma correta representação da suas variáveis. Um exemplo é polinômio do canal de fuga de Xingó. Sua inconsistência com a faixa operativa pode ser observada graficamente pela curvatura íngreme e decrescente da Figura 2.14.

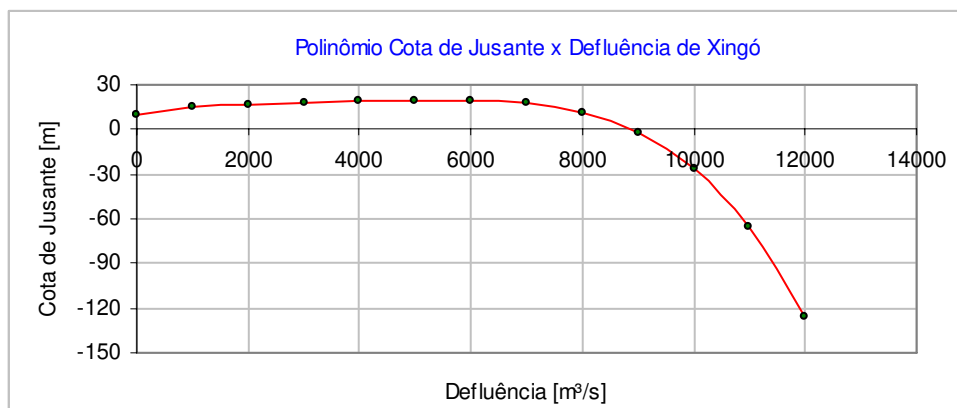


Figura 2.14 Polinômio cota de jusante $\times$ defluência de Xingó no “Hidr.dat” de abril de 2009.

A partir da avaliação das características dos dados do SEB, conclui-se que a qualidade dessas informações pode prejudicar o desempenho dos *softwares* utilizados no

planejamento da operação energética. Segundo Lopes (2007), “É comum encontrar no arquivo Hidr.dat dados estimados à época do projeto de usinas, construídas há muitos anos, sem que os dados históricos tenham sido usados na sua aferição”.

Frente a essa realidade, o desenvolvimento de uma metodologia de consolidação de dados de usinas hidrelétricas torna-se essencial para a confiabilidade dos modelos computacionais desenvolvidos para o planejamento e a programação da operação hidrotérmica.

Em branco

Capítulo 3

Ferramentas Utilizadas

Este capítulo apresenta ao leitor as ferramentas de apoio à aplicação da metodologia de consolidação de dados. A primeira ferramenta, o HydroData, é um gerenciador dos dados das usinas hidrelétricas do SIN. A segunda, o HydroConsulta, é um software que permite a construção de consultas aos dados do setor elétrico. A terceira, o HydroSim, é um simulador da operação de usinas hidrelétricas.

3.1 O Gerenciador de Dados HydroData

A necessidade de um banco de dados único, completo e amigável para as usinas hidrelétricas incentivou o desenvolvimento do HydroData. Detalhes sobre a implementação computacional e os recursos desse programa são encontrados em Cicogna e Soares (2003) e Cicogna (2003).

O HydroData é um módulo do sistema HydroLab que permite a organização, padronização e gerenciamento dos dados das principais usinas hidrelétricas brasileiras. Atualmente, essa base de dados conta com um total de 142 aproveitamentos pertencentes ao SIN.

Apenas para ilustração, na Figura 3.1, apresenta-se a janela principal do HydroData. Os dados visíveis pertencem à usina hidrelétrica (UHE) Itaipu, selecionada na interface.

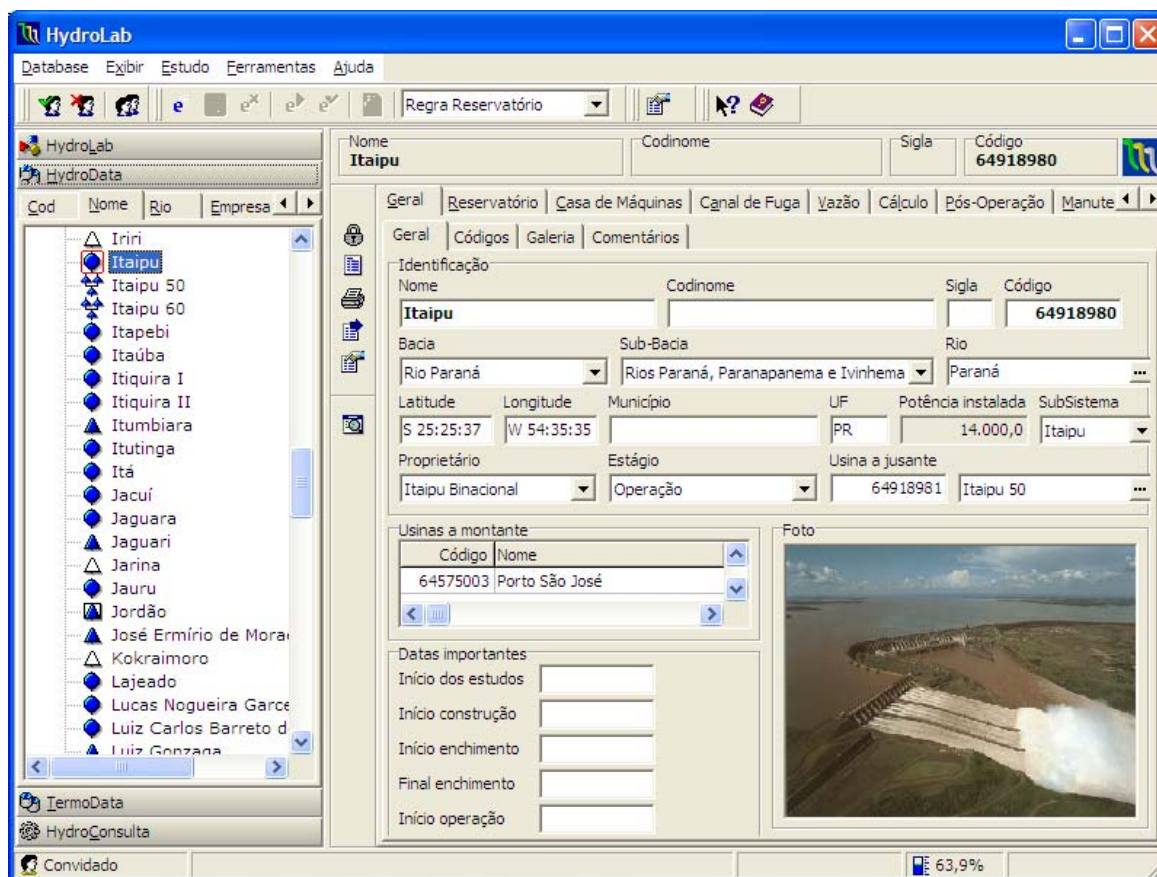


Figura 3.1 A janela principal do programa HydroData.

Observando a Figura 3.1, percebe-se que o usuário pode escolher apresentar as usinas organizadas por código, nome, rio, empresa, bacia ou subsistema. Uma vez que esse

banco de dados é capaz de armazenar aproveitamentos que ainda não estão em operação, um símbolo é colocado na frente do nome de cada usina, a fim de classificá-las de acordo com a Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Classificação das usinas do HydroData.

Símbolo	Tipo de Reservatório	Estágio da Usina
	Acumulação	Em operação
		Em construção
		Empreendimento apenas outorgado
	Compensação	Em operação
		Em construção
		Empreendimento apenas outorgado
	Usina fictícia criada por necessidades específicas dos modelos	

Pode-se verificar também, que os dados da usina selecionada são organizados em nove categorias: *Geral*, *Reservatório*, *Casa de Máquinas*, *Canal de Fuga*, *Vazão*, *Cálculo*, *Pós-Operação*, *Manutenção* e *Vertedouro*.

- **Geral:** esta categoria gerencia dados sobre a identificação e localização da UHE. Fotos e comentários sobre a usina são também apresentados. Essas informações estão divididas em quatro abas.
- **Reservatório:** neste item são mostrados os dados relacionados com o reservatório da usina, tais como: descrição física, evaporação e volume de espera. É possível visualizar graficamente os polinômios que correlacionam o nível d'água com o volume armazenado e a área alagada. Esse item também possui quatro abas.
- **Casa de Máquinas:** esta categoria gerencia informações sobre os conjuntos turbina/gerador. São apresentados gráficos das funções de potência máxima e engolimento máximo das máquinas. Ela tem recursos para visualização da curva colina de rendimento da turbina em três dimensões. No total, são oito abas para essa categoria.
- **Canal de Fuga:** neste item são mostrados os dados relacionados com o canal de fuga da usina, tais como: limites de defluência e cotas máxima e mínima operativas. Pode-se visualizar graficamente a função que relaciona a cota do nível d'água de jusante com a vazão defluente.

- **Vazão:** esta categoria apresenta o histórico de vazões naturais e incrementais da usina, em base mensal ou anual. Ela também mostra o gráfico de frequência e permanência das vazões para cada mês. Essa categoria tem seis abas.
- **Cálculo:** este item permite ao usuário fornecer o armazenamento e a defluência da usina para obter sua potência, rendimento, vertimento, produtividade, queda bruta e perda hidráulica. Ele mostra tabelas e gráficos distribuídos em oito abas.
- **Pós-Operação:** para um período específico, essa categoria mostra os dados de operação registrados pela usina selecionada. São nove abas com gráficos e oito abas com tabelas, utilizadas para apresentar as informações de volume armazenado; vazão afluente, turbinada, vertida e defluente; geração; queda bruta e líquida; perda hidráulica; rendimento e número de máquinas ligadas.
- **Manutenção:** este item contém informações sobre a manutenção programada das máquinas da usina selecionada.
- **Vertedouro:** esta categoria exibe as características físicas do vertedouro, tais como: tipo, número de comportas e capacidade de vertimento.

Os recursos gráficos do HydroData permitem uma análise crítica sobre a qualidade das informações nele contida. Por exemplo, espera-se que o polinômio que descreve a relação cota x volume do reservatório de uma usina tenha uma forma semelhante à da Figura 3.2. Entretanto, se há alguma simplificação dessa informação ele pode ser apresentado como na Figura 3.3.

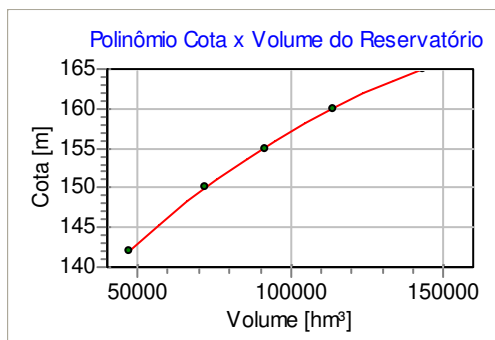


Figura 3.2 Representação da variação do nível de montante em função do volume armazenado.

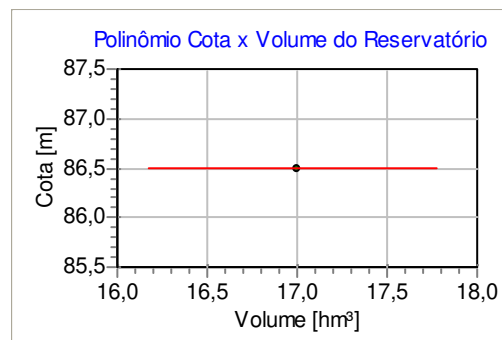


Figura 3.3 Representação simplificada da variação do nível de montante em função do volume armazenado.

Em relação ao polinômio que descreve a relação cota x defluência do canal de fuga, deseja-se que seu formato se assemelhe ao da Figura 3.4. No entanto, se há algum problema com o ajuste dessa informação, ele pode ser apresentado como na Figura 3.5.

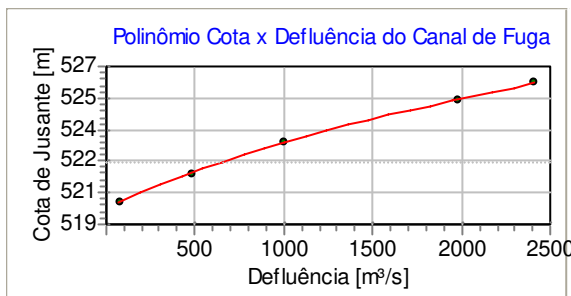


Figura 3.4 Variação do nível de jusante em função da vazão defluente.

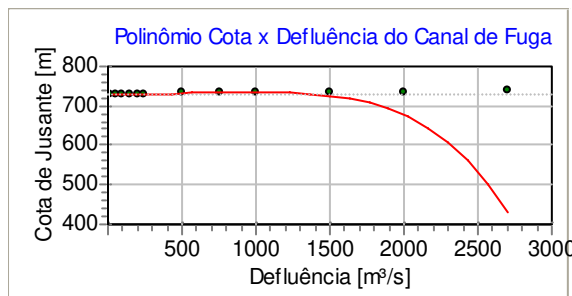


Figura 3.5 Polinômio mal ajustado para a representação da cota de jusante x defluência.

A fim de avaliar detalhadamente a curva colina de rendimento de uma turbina, o HydroData permite que sejam feitos cortes horizontais ou verticais nessa função, criando planos bidimensionais. Na Figura 3.6, apresenta-se uma curva colina em três dimensões. O corte horizontal feito nessa função, Figura 3.7, mostra a variação do rendimento para o valor de potência igual a 89 MW. Os degraus exibidos nessa figura indicam problemas na representação do rendimento em função da potência e da queda bruta.

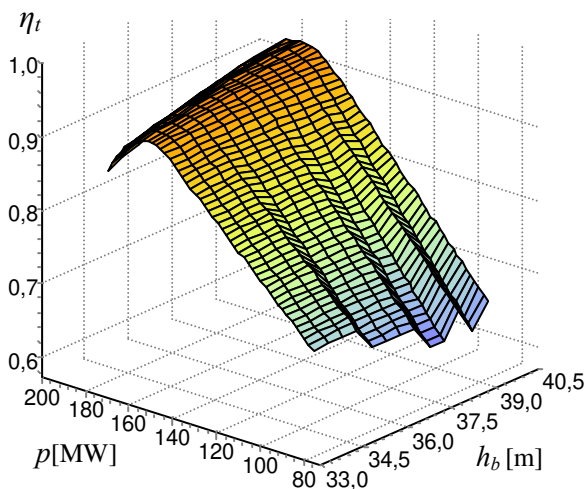


Figura 3.6 Função de rendimento da turbina de uma unidade geradora.

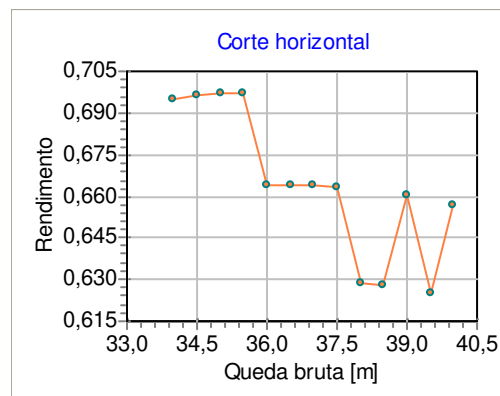


Figura 3.7 Corte horizontal sobre a curva colina ao lado ($p = 89$ MW).

Os três exemplos anteriores demonstram que o HydroData pode ser usado como ferramenta para uma avaliação preliminar da qualidade das informações que ele gerencia. Entretanto, a análise gráfica que ele possibilita é individual por usina, ou seja, depende do usuário vasculhar toda a base de dados.

3.2 O Construtor de Consultas HydroConsulta

Com o objetivo de fazer uma varredura detalhada nas informações de todas as usinas hidrelétricas de uma única vez, criou-se uma ferramenta de coleta e análise de dados denominada HydroConsulta. Detalhes sobre a implementação computacional, os recursos e a aplicação desse programa podem ser encontrados em Hidalgo (2004) e Hidalgo et al. (2009a e 2009b).

O HydroConsulta é um módulo do sistema HydroLab que permite construir, armazenar e gerenciar consultas aos dados das usinas hidrelétricas brasileiras. A versão inicial desse sistema consultava apenas as informações gerenciadas pelo HydroData. Atualmente, ele pode acessar a base de dados da maior parte dos agentes de geração de energia do SIN.

Na Figura 3.8, apresenta-se a janela principal do HydroConsulta. O objetivo da consulta selecionada é apenas listar a sigla e o nome das usinas do SIN que não possuem uma representação da variação do nível de montante em função do volume armazenado.

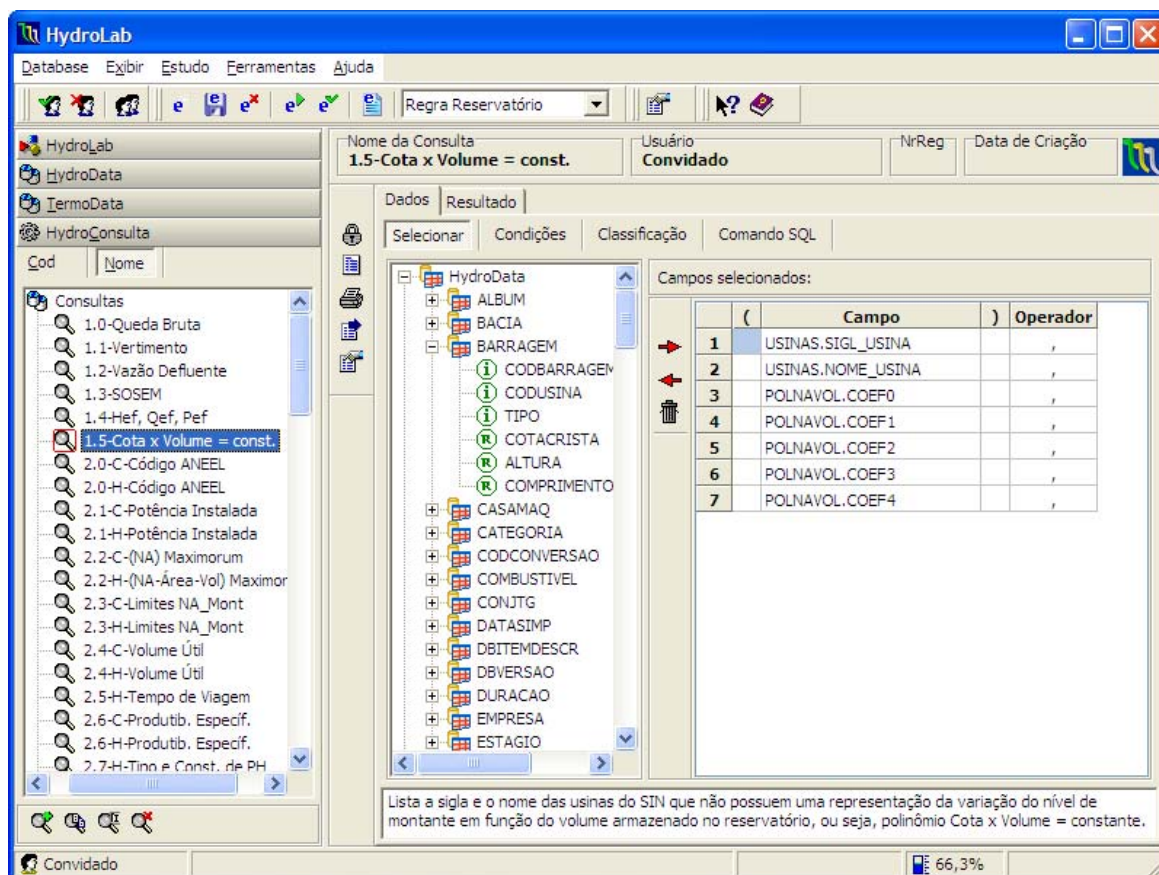


Figura 3.8 A janela principal do programa HydroConsulta.

As consultas desse sistema podem ser apresentadas por ordem de código ou nome. O gerenciamento delas é feito usando os quatro botões, do canto inferior esquerdo da figura anterior. Esses botões executam as ações listadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Ações dos botões de gerenciamento das consultas.

Botão	Ação executada
	Adiciona uma consulta
	Cria uma cópia da consulta selecionada
	Renomeia a consulta selecionada
	Exclui a consulta selecionada

Ainda em relação à Figura 3.8, nota-se que as características da consulta ativa são definidas nas abas chamadas: *Selecionar*, *Condições*, *Classificação* e *Comando SQL*. Estas abas estão agrupadas na categoria *Dados*.

- **Selecionar:** nesta aba, visível na Figura 3.8, é possível selecionar o conjunto de campos que serão mostrados no resultado da consulta. Para a escolha dos campos é apresentada uma lista das bases de dados às quais o HydroConsulta está conectado. Nessa janela existem recursos que permitem renomear um campo, associá-lo a uma função ou ainda, utilizar operadores aritméticos para relacioná-lo a outros campos. Há também um espaço reservado para a descrição da consulta.
- **Condições:** nesta aba são definidos os filtros da consulta. Primeiro é necessário escolher os campos para os quais os filtros serão aplicados. Um operador lógico ou de comparação deve associar o(s) campo(s) ao valor do filtro. Se mais de uma condição é necessária, estas devem ser conectadas usando operadores de conjunção. Nessa janela há um botão, chamado *Condições Automáticas*, que constrói todos os filtros dependentes do relacionamento entre as tabelas envolvidas na consulta.
- **Classificação:** nesta aba são escolhidos os campos que ordenarão o resultado da consulta. Eles podem ser classificados de maneira ascendente ou descendente.
- **Comando SQL:** nesta aba é mostrado o comando responsável pela consulta, construído automaticamente pelo sistema, de acordo com as especificações do usuário nas abas Selecionar, Condições e Classificação. A edição do comando não é necessária, mas é permitida.

No mesmo nível da categoria Dados aparece a categoria *Resultado*. Nela é apresentado o resultado da consulta. Ou seja, são mostrados os campos escolhidos pelo usuário na aba Selecionar, com o conteúdo dos registros que correspondem ao filtro da aba Condições, na ordem estabelecida na aba Classificação. Os dados exibidos como resultado da consulta podem ser manipulados em operações matemáticas. Para isso, há um botão específico que exporta esses dados para planilhas eletrônicas, como o Excel (BLOCH, 2003).

Embora o HydroConsulta faça uso da *Structured Query Language (SQL)* e do conceito de BDR para a execução interna de suas consultas, esses conhecimentos não são pré-requisitos para a utilização do sistema. Percebe-se, pela descrição do conteúdo das abas, que para criar uma consulta usando esse módulo, o usuário necessita apenas escolher as informações que ele quer examinar, o filtro da consulta e a ordem de apresentação dos resultados.

O gerenciador de consultas pode ser usado também como um gerador de relatórios e como um visualizador da estrutura da base de dados. Além disso, ele tem duas outras facilidades. Uma delas é a possibilidade de exportar consultas, da base de dados para um arquivo texto, e a outra é a possibilidade de importar consultas, de um arquivo texto para a base de dados do módulo. Isso significa que as consultas gerenciadas por ele são facilmente transportadas de uma máquina para outra porque, em geral, arquivos texto são menores que arquivos de base de dados. Os arquivos texto criados por esse módulo podem ser armazenados como *backup*.

Usando o HydroConsulta é possível determinar respostas à questões importantes para a análise da qualidade dos dados das usinas hidrelétricas brasileiras. São exemplos dessas consultas:

1. Quais usinas possuem rendimento médio inconsistente no processo de conversão da energia potencial em elétrica? A mesma questão pode ser feita em relação ao rendimento global variável da usina.
2. Quais usinas não dispõem de informações sobre a elevação do canal de fuga em função da vazão defluente? Essa análise pode ser reproduzida para as funções que relacionam o nível de montante com a área e o volume do reservatório.

3. Quais usinas não possuem uma representação da potência máxima em função da queda bruta? A mesma observação pode ser feita para a função de engolimento máximo.
4. Pode-se avaliar se os dados registrados pela usina são coerentes com os limites físicos de armazenamento, defluência e geração.
5. É também possível checar, se as variáveis relacionadas na função de produção hidrelétrica são coerentes entre si, ou seja, se a igualdade da Equação 2.2 é satisfeita a cada intervalo de tempo. Essa consulta pode ser repetida para a equação de balanço hídrico, Equação 2.1.

3.3 O Simulador da Operação de Usinas Hidrelétricas HydroSim

Com a finalidade de simular a operação de usinas hidrelétricas e obter informações sobre a evolução temporal dos níveis dos reservatórios e das vazões defluentes, foi desenvolvido o HydroSim. Detalhes sobre a implementação computacional e os recursos desse programa são encontrados em Cicogna (2003) e Cicogna et al. (2005 e 2007).

O HydroSim é um módulo do sistema HydroLab que permite simular a operação das usinas hidrelétricas do SIN a partir, por exemplo, do conhecimento da situação inicial dos reservatórios, das vazões afluentes previstas, da programação de geração, das características das usinas e das restrições de operação hidráulica dos reservatórios. Com esse tipo de ferramenta é possível identificar os impactos que a superposição de restrições operativas tem no comportamento do sistema gerador.

Esse módulo foi criado para a representação computacional de várias regras operativas para sistemas hidrotérmicos. Independente da regra operativa, o simulador computa as metas de geração ou de defluência de cada usina hidrelétrica do sistema, em cada intervalo do horizonte de simulação, e leva o sistema gerador para um novo estado de armazenamento. Esse processo de simulação baseia-se no cálculo do balanço hídrico, Equação 2.1, e na função de produção hidrelétrica, Equação 2.2.

Após realizar o cálculo do balanço hídrico, o simulador verifica o atendimento das restrições de operação. As restrições de operação são diferentes dependendo do horizonte

do estudo. Por esse motivo, o HydroSim se divide em: HydroSim LP, para simulações em horizontes de médio e curto prazo e, HydroSim CP, para horizontes de curtíssimo prazo.

HydroSim LP

O HydroSim LP é a implementação computacional de um modelo de simulação a usinas individualizadas para a operação energética de sistemas hidrotérmicos. Ele é utilizado para horizontes de médio e curto prazo, com discretização semanal, mensal ou mista. Esse modelo é capaz de representar em detalhes as restrições operacionais ativas em tais horizontes como, por exemplo: limites operativos das usinas, restrições hidrológicas, configuração dinâmica do sistema gerador, manutenção e falhas na operação das usinas e fenômeno de evaporação na superfície dos reservatórios.

Na Figura 3.9, apresenta-se a trajetória de armazenamento da UHE Furnas num estudo feito no HydroSim LP.

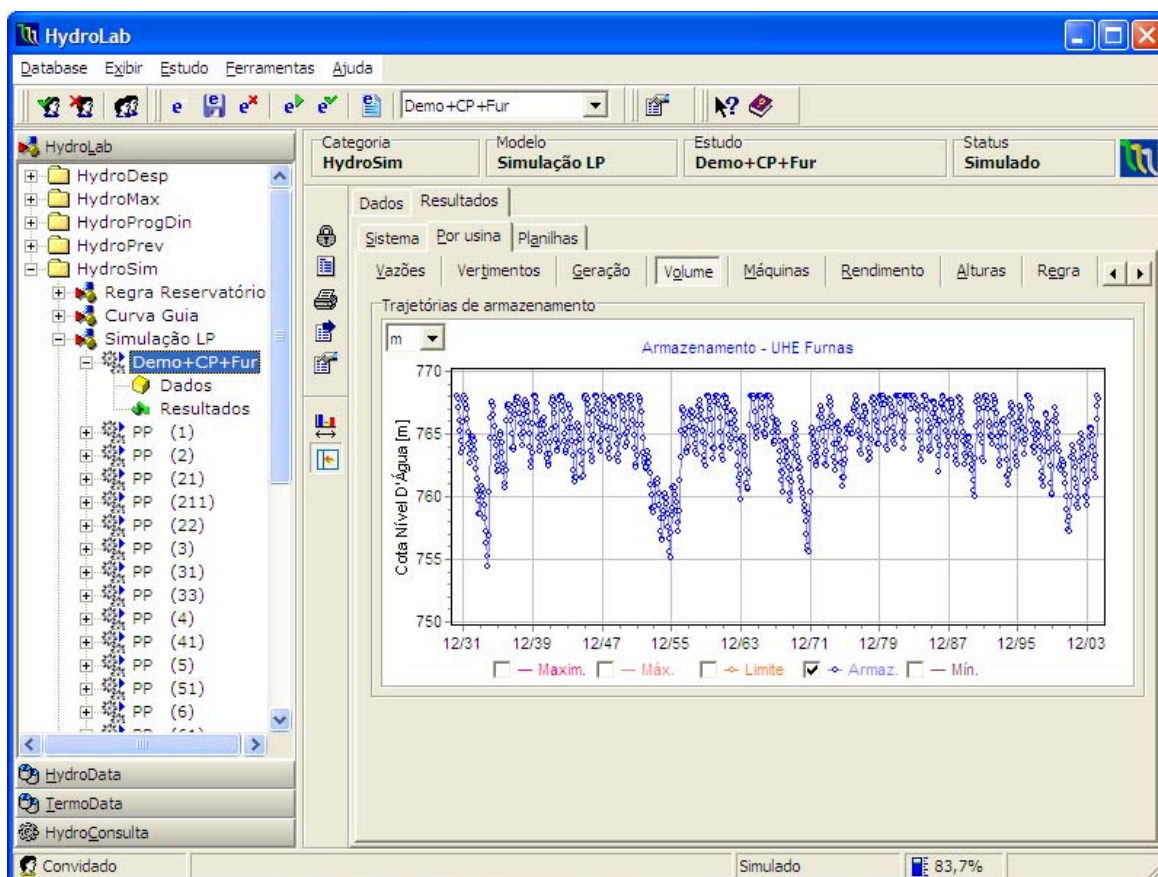


Figura 3.9 A interface do HydroSim LP.

HydroSim CP

No curtíssimo prazo a modelagem das usinas hidrelétricas recebe algumas modificações para adequação às características do problema. Por exemplo, nesse horizonte todos os reservatórios possuem faixa de operação, mesmo as usinas a fio d'água. Além disso, o cálculo do rendimento das máquinas deve ser preciso, considerando as curvas colina ao invés dos coeficientes médios de rendimento. Também, o tempo de viagem das vazões defluentes entre reservatórios deve ser considerado.

Diante dessas modificações, o HydroSim CP é a implementação computacional de um modelo de simulação às usinas individualizadas para sistemas hidrelétricos, que considera o número de máquinas em operação. Esse modelo representa em detalhes as restrições relacionadas ao curtíssimo prazo, tais como: o cronograma de manutenção das máquinas, as falhas na operação das usinas, o tempo de viagem entre barragens, a operação das comportas e as regras operativas para o controle de cheias. Na Figura 3.10, apresenta-se a trajetória de geração de Furnas num estudo feito no HydroSim CP.

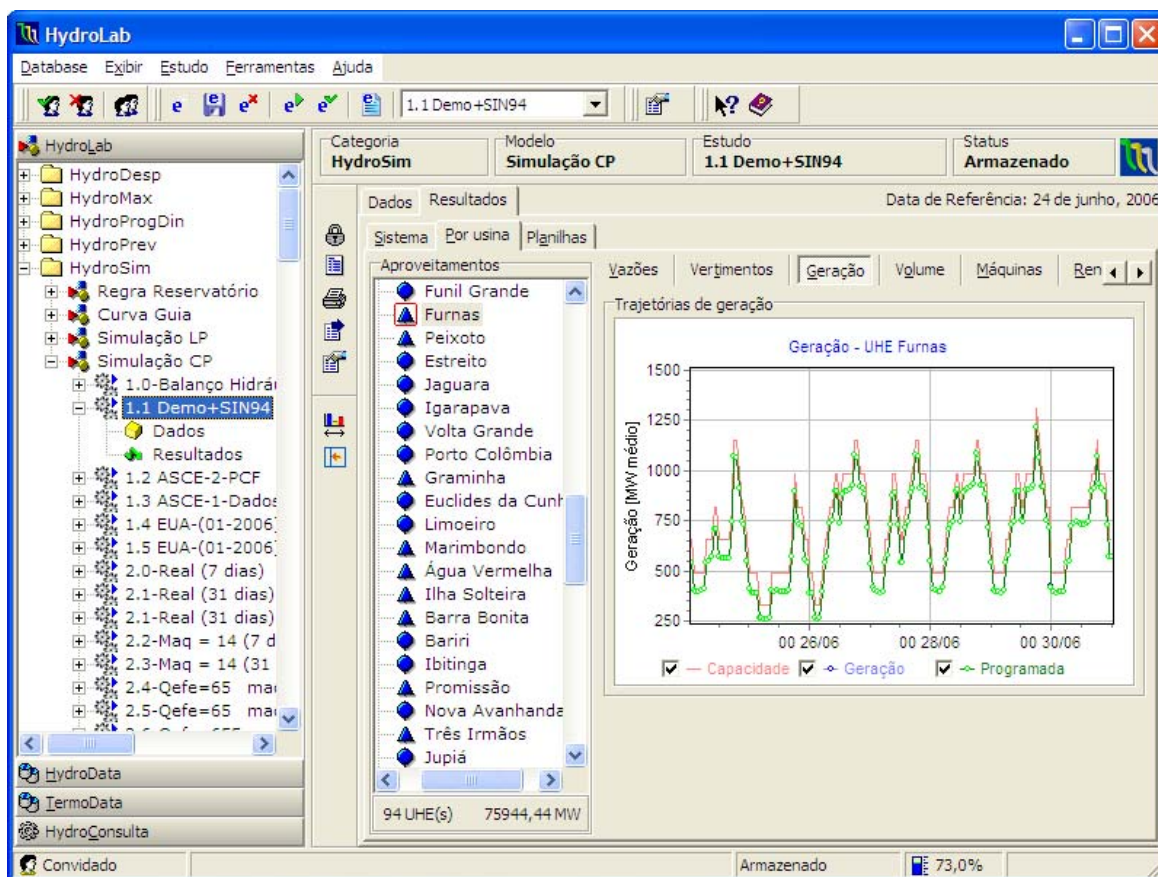


Figura 3.10 A interface do HydroSim CP.

Embora o objetivo principal do HydroSim seja simular a operação de usinas hidrelétricas, ele também pode ser usado como uma ferramenta para a análise da consistência dos dados. Nesse caso, ao invés de planejar a operação futura ele é utilizado para reproduzir a operação passada de uma ou várias usinas hidrelétricas. Dessa forma, a proximidade entre as trajetórias simuladas e as trajetórias verificadas indica o quanto os dados físicos da usina são coerentes com os dados de operação registrados na base.

O projeto de software e a implementação computacional do HydroData, HydroConsulta e HydroSim usam o paradigma da orientação a objeto (CICOGNA, 1999 e HORSTMANN, 1997), a linguagem de programação C++ (HOLLINGWORTH et al., 2001 e JOSUTTIS, 1999), e a linguagem estruturada SQL (ELMASRI e NAVATHE, 2000 e BOWMAN et al., 1996).

Capítulo 4

Metodologia para Consolidação de Dados

Neste capítulo, descreve-se a metodologia proposta para a consolidação dos dados das usinas hidrelétricas brasileiras. Os procedimentos são apresentados em duas etapas. Na primeira, analisa-se a coerência da base de dados, com o objetivo de conhecer a estrutura do banco e a qualidade das informações. Na segunda etapa são selecionados os registros consistentes e é apresentada uma sequência para consolidação das funções que representam as características físicas da usina.

4.1 Análise da Coerência da Base de Dados

A fase de análise da coerência da base de dados tem dois objetivos principais. O primeiro é conhecer a estrutura do banco com a finalidade de descobrir onde, e de que forma, algumas informações específicas estão armazenadas. O segundo objetivo é verificar a qualidade dos dados, pois registros inconsistentes devem ser desprezados.

Embora as análises desta seção pareçam desnecessárias, por envolverem questões simples, ela é importante para o processo de consolidação. Cabe ressaltar que os testes apresentados são resultados diretos de problemas já encontrados em bases de dados reais do setor elétrico.

4.1.1 Coerência entre os Dados de Operação

Com relação aos dados de operação registrados na base, deve-se obter respostas às seguintes questões:

1. O valor registrado como queda bruta é coerente com a diferença entre o nível de montante e de jusante para todos os intervalos de operação, Equação 4.1? Em geral, essa informação é armazenada corretamente. No entanto, alguns agentes registram valores negativos para essa variável.

$$h_b = \phi(x) - \theta(u) \quad (4.1)$$

2. O valor da defluência é igual à soma das vazões turbinada e vertida, Equação 4.2? Algumas empresas registram separadamente, por exemplo, a vazão que sai do reservatório para fins de eclusagem. Uma vez que essa vazão não gera energia, ela e outros tipos de retirada de água do reservatório devem ser computados como vertimento.

$$u = q + v \quad (4.2)$$

3. O vertimento total do aproveitamento é igual à soma de todos os tipos de vertimentos gerenciados pela usina, tais como: soleira livre, descarregador de fundo e tulipa, Equação 4.3? Alguns agentes percebem a necessidade de um novo vertedouro quando a usina já está em operação. Caso a base de dados não seja atualizada, a igualdade da equação abaixo não se verifica.

$$v_{total} = v_1 + v_2 + \dots + v_n \quad (4.3)$$

4. Os dados registrados na base respeitam a igualdade da equação de balanço hídrico, Equação 2.1? Algumas empresas alteram, por exemplo, o polinômio cota x volume do reservatório, mas computam a vazão afluyente usando tabelas antigas. Isso pode provocar inconsistências no balanço hídrico.

4.1.2 Coerência dos Dados de Operação com os Limites da Usina

O valor das variáveis deve respeitar os limites de operação da usina, ou seja, as condições de contorno. No entanto, os erros no processo de medição, a leitura incorreta ou o engano nos cálculos podem gerar valores que não condizem com a faixa de operação do reservatório, do canal de fuga ou dos equipamentos. Diante disso, é importante verificar se os dados registrados são coerentes com os limites de armazenamento, defluência e potência da usina, conforme a sequência seguinte.

- $\emptyset(x)_{min} \leq \emptyset(x) \leq \emptyset(x)_{max}$
- $u_{min} \leq u \leq u_{max}$
- $q_{min} \leq q \leq q_{max}$
- $p_{min} \leq p \leq p_{max}$

4.1.3 Coerência dos Dados de Operação com a Realidade Física

Algumas usinas hidrelétricas brasileiras registram valores negativos para a vazão afluyente. A justificativa delas é que a metodologia utilizada no cálculo dessa variável permite que isso aconteça, para valores horários, quando há uma oscilação considerável no nível de montante. Entretanto, nos valores médios diários ou mensais essa ocorrência é menos provável.

Outra informação que deve ser analisada é o rendimento global da usina no processo de conversão da energia potencial em elétrica. Tanto o rendimento global médio quanto o rendimento global variável não devem assumir valores fora de uma faixa usual. Em geral, considera-se razoável, os valores de rendimento compreendidos no intervalo entre 73% e 94% para as perdas na turbina, no gerador e no circuito hidráulico (ARCE, 2006).

No final dessa fase, tem-se uma lista dos registros inconsistentes da operação da usina. Esses registros devem ser desprezados na etapa seguinte, pois os procedimentos da

consolidação efetiva das funções baseiam-se nas informações coerentes armazenadas no banco de dados.

4.2 Consolidação Efetiva das Funções

A fim de selecionar os dados a serem consolidados, fez-se uma análise detalhada da equação de balanço hídrico, Equação 2.1, e da função de produção hidrelétrica, Equação 2.2. Os dados envolvidos no planejamento da operação hidrelétrica foram classificados em *físicos e de operação*, apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Classificação dos dados em físicos e de operação.

Dados Físicos	
(1)	Polinômio Área x Cota
(2)	Polinômio Cota x Volume
(3)	Polinômio Cota de Jusante x Defluência
(4)	Função de Potência Máxima
(5)	Função de Engolimento Máximo
(6)	Função de Perda Hidráulica
(7)	Função de Rendimento do Gerador
(8)	Função de Rendimento da Turbina (Curva Colina)
(9)	Função de Rendimento Global
Dados de Operação	
Variável	Forma de Obtenção
Nível de Montante	Medido diretamente
Nível de Jusante	Medido diretamente
Volume do Reservatório	Usa o polinômio 2
Vazão Afluente	Usa o polinômio 2
Vazão Turbinada	Usa as funções 6, 7 e 8
Vazão Vertida	Tabela vazão vertida x abertura
Potência Gerada	Medido indiretamente
Evaporação	Usa o polinômio 1
Perda Hidráulica	Usa a função 6
Rendimento Turbina/Gerador	Usa as funções 7 e 8

Conforme mencionado no Capítulo 2 e verificado na Tabela 4.1, com exceção dos níveis de montante e de jusante e da potência gerada, todas as demais variáveis são calculadas utilizando dados físicos. Por exemplo, o cálculo que converte o nível d'água do reservatório em volume armazenado faz uso da função inversa do polinômio cota x volume, que é uma informação física. Da mesma forma, o cálculo do rendimento variável da turbina utiliza a matriz representada pela curva colina.

Portanto, os procedimentos desta seção sugerem que os dados físicos sejam consolidados. Além disso, recomenda-se que as funções de rendimento da turbina, do gerador e perda hidráulica, concentrem-se numa única, chamada *Função de Rendimento Global*. O motivo da junção dessas funções é que as informações da base de dados e as avaliações de uma usina em operação referem-se ao efeito do conjunto turbina, gerador e circuito hidráulico, impossibilitando a consolidação separada das funções. Assim sendo, serão consolidados: os polinômios área x cota, cota x volume e cota de jusante x defluência e as funções de potência máxima, engolimento máximo e rendimento global.

4.2.1 Polinômio Área x Cota

Para a consolidação do polinômio área x cota é necessário se reportar aos dados levantados na fase de projeto da usina. O documento ANEEL (2009b) define as diretrizes para a elaboração de estudos de cartografia, topografia, geoprocessamento e de *Global Positioning System (GPS)* para projetos de implantação de usinas hidrelétricas. Dos resultados dessa fase, utiliza-se a relação “área alagada x cota de montante” e os níveis característicos do reservatório. De posse desses valores, pode-se construir uma tabela na qual, para valores de cota não pertencentes ao levantamento aerofotogramétrico, a área pode ser interpolada ou extrapolada linearmente.

A partir dos pontos da tabela que relaciona a área do reservatório com o nível de armazenamento, deve-se ajustar um polinômio utilizando, por exemplo, a ferramenta *Linha de Tendência* do Excel. Essa ferramenta utiliza o método dos mínimos quadrados. Inicialmente desenha-se um gráfico do tipo *Dispersão* para os pontos. Na sequência, associa-se a esses pontos uma linha de tendência do tipo *Regressão Polinomial* de ordem máxima igual a 4 (ONS, 2007b). É aconselhável exibir a equação polinomial no gráfico.

Seguindo o padrão do ONS, os coeficientes devem ter 7 algarismos significativos. Para a faixa de validade do polinômio recomenda-se incluir pelo menos três pontos do levantamento original e três níveis característicos do reservatório. A precisão da área pode ser fixada igual ao dado de projeto, sem arredondamento.

Um desvio do polinômio área x cota consolidado, em relação ao oficial, pode ter impacto direto no cálculo da evaporação do reservatório utilizado nos modelos de

planejamento da operação hidrelétrica. Por isso, após a consolidação do polinômio área x cota, recomenda-se notificar o operador da substituição da tabela que relaciona essas variáveis.

4.2.2 Polinômio Cota x Volume

O ajuste do polinômio cota x volume é feito a partir dos pares “área x cota” do polinômio apresentado no item anterior. Para cada um desses pares, devem ser refeitos os cálculos dos volumes de acordo com a metodologia de *Tronco de Prisma* (DOLCE e POMPEO, 2005), supondo uma variação linear. Logo, pode-se recalcular o volume do reservatório compreendido entre duas medições “área x cota”, segundo a Equação 4.4.

$$x_j = \left[\frac{(A_j + A_{j-1})}{2} \right] \cdot \Delta z m \quad (4.4)$$

onde:

j é o índice da linha da tabela área x cota;

A_j é a área do reservatório na linha j da tabela área x cota [km^2];

A_{j-1} é a área do reservatório na linha $j - 1$ da tabela área x cota [km^2];

$\Delta z m$ é a variação do nível de montante, ou seja, $z m_j - z m_{j-1}$ [m].

Dessa forma, acrescenta-se aos pares “área x cota” a informação de volume. A partir dos pontos da tabela que relaciona o nível de armazenamento com o volume do reservatório pode-se, de maneira similar à apresentada no item anterior, ajustar um polinômio a esses pontos, conforme ilustração feita na Figura 4.1. A quantidade de algarismos significativos dos coeficientes, a faixa de validade do polinômio e a precisão das variáveis devem seguir o mesmo padrão do polinômio área x cota.

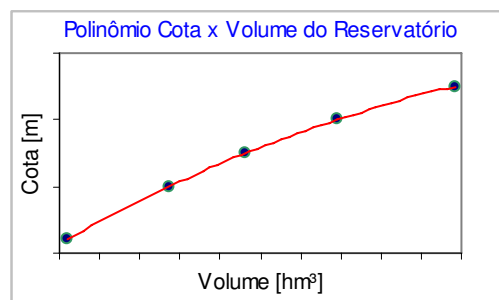


Figura 4.1 Ajuste do polinômio cota x volume.

Uma diferença entre o polinômio cota x volume oficial e ajustado se reflete no cálculo do balanço hídrico do reservatório da usina. Como consequência, não só o volume final de um período como também as vazões afluentes registradas na base podem tornar-se comprometidos. Portanto, o uso do polinômio consolidado deve vir acompanhado do recálculo dos dados históricos a fim de manter a coerência entre dados físicos e variáveis de operação registradas na base. Após a consolidação do polinômio cota x volume, também é importante notificar o operador da substituição da tabela que relaciona essas variáveis.

4.2.3 Polinômio Cota de Jusante x Defluência

Para a consolidação do polinômio cota de jusante x defluência são necessários os pares “nível do canal de fuga x vazão defluente”, registrados pela usina num determinado período. As leituras do nível do canal de fuga devem ter periodicidade máxima horária e precisão de centímetros, sem arredondamentos. É importante que o período escolhido seja recente, para representar a atual situação do leito do rio à jusante. Deve-se ter conhecimento do comportamento do canal para as maiores cheias do histórico, visando estabelecer os limites máximos da função.

Grafando-se os pares de “nível de jusante x vazão defluente”, pode-se ajustar uma função polinomial à nuvem de pontos da operação do canal, conforme ilustração feita na Figura 4.2. O polinômio deve ser extrapolado até a vazão correspondente à capacidade dos vertedouros, para que a faixa de validade considere todos os valores possíveis de vazões defluentes. Novamente, deve-se indicar a faixa de validade da função, pois fora dela poderão ocorrer inflexões do polinômio ajustado causando erros na representação do canal de fuga.

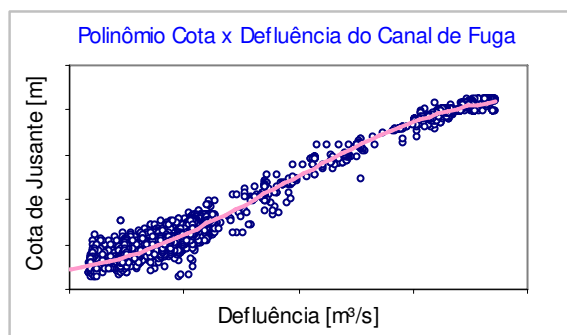


Figura 4.2 Ajuste polinomial à nuvem de pontos da operação do canal de fuga.

Uma vez que o polinômio cota de jusante x defluência é ajustado a uma nuvem de pontos, é interessante verificar o valor do coeficiente de determinação (R -*quadrado*) da equação. Quanto mais próximo de “1” for o valor do R -*quadrado*, melhor é a aderência dos pontos à curva (BLOCH, 2003).

Para algumas usinas hidrelétricas a elevação do canal de fuga também depende do remanso na confluência de rios ou do reservatório da usina imediatamente a jusante. Nesse caso, a usina pode ter mais de um polinômio para representar o canal de fuga com faixas de validade distintas e complementares.

O polinômio cota de jusante x defluência oficial de algumas usinas hidrelétricas brasileiras não é coerente com a nuvem de pontos registrados na base de dados. Isso causa erros acumulativos na queda bruta calculada pelos modelos de planejamento e programação da operação, comprometendo o resultado matemático da função de produção, Equação 2.2.

4.2.4 Função de Potência Máxima

Para uma boa representação dos limites operativos da usina podem ser efetuados testes de potência máxima. O ideal é procurar períodos com quedas baixas, pois nessa faixa, conforme mencionado no Capítulo 2, a limitação da produção elétrica é pela turbina. Deve-se medir a potência para a máxima abertura do distribuidor e os níveis de montante e de jusante. É importante observar as faixas proibidas devido à vibração ou cavitação na turbina. Na falta de testes é possível, preliminarmente, ajustar as funções de potência e engolimento máximos analisando os dados históricos.

A forma de ajuste dessa função utilizando dados históricos depende da precisão dos dados da base. Por exemplo, algumas empresas de geração de energia elétrica registram o valor da geração por máquina. Outras armazenam o valor da geração total da usina e o número de máquinas em operação, para cada intervalo.

- **Valor de geração para cada máquina da usina:** as empresas que dispõem do valor de geração por máquina podem consolidar a função de potência máxima grafando os pontos de potência verificada da máquina em função da altura de queda bruta. A curva de potência máxima será determinada como uma envoltória sobre a

nuvem de pontos medidos. Como resultado, obtém-se a queda efetiva h_{efe} e a potência efetiva p_{efe} para cada máquina da usina, Figura 4.3.

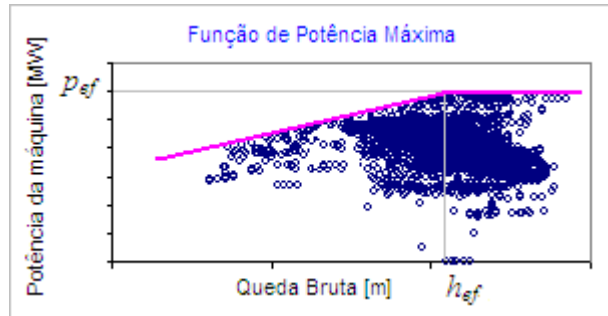


Figura 4.3 Ajuste da função de potência máxima para uma máquina.

- **Valor de geração total da usina com conhecimento do número de máquinas:** as empresas que dispõem do valor de geração total da usina, com conhecimento do número de máquinas em operação, podem ajustar a função de potência máxima grafando os pontos de potência verificada da usina, dividida pelo número de máquinas em operação, em função da altura de queda bruta. Novamente, a curva de potência máxima será determinada como uma envoltória sobre a nuvem de pontos medidos. Como resultado, obtém-se os mesmos valores de queda e potência efetivas para todas as máquinas da usina, Figura 4.4.

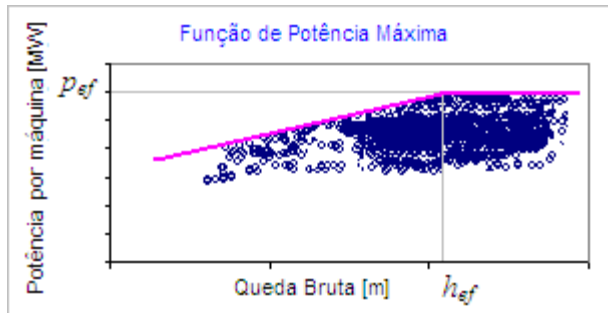


Figura 4.4 Ajuste da função de potência máxima para todas as máquinas da usina.

Quando a função de potência máxima oficial está acima da consolidada impõe-se um risco ao sistema, pois a empresa acredita que possui uma disponibilidade de geração que pode não ser real. Por outro lado, quando a função de potência máxima oficial está abaixo da consolidada, os modelos de simulação da operação de usinas hidrelétricas podem não atingir a meta de geração de energia, por estarem limitados por essa função.

4.2.5 Função de Engolimento Máximo

O procedimento de consolidação da função de engolimento máximo é semelhante ao apresentando no item anterior. Para uma boa representação dessa função o ideal é fazer testes de engolimento máximo. No entanto, na falta de testes é possível, preliminarmente, ajustá-la analisando os dados históricos.

A precisão dos dados da base também influencia na forma de ajuste da função de engolimento máximo. Por exemplo, as empresas de geração de energia elétrica podem registrar, no banco de dados, o valor de vazão turbinada por máquina. Para isso, basta utilizar a tabela que relaciona potência, queda bruta e vazão turbinada de cada máquina. Porém, a maioria das empresas armazena o valor de vazão turbinada total da usina e o número de máquinas em operação, para cada intervalo.

- **Valor de vazão turbinada para cada máquina da usina:** as empresas que dispõem do valor de vazão turbinada por máquina podem consolidar a função de engolimento máximo grafando os pontos de vazão turbinada da máquina em função da altura de queda bruta. A curva de engolimento máximo será determinada como uma envoltória sobre a nuvem de pontos. Como resultado, obtém-se a queda efetiva h_{efe} e o engolimento efetivo q_{efe} para cada máquina da usina, conforme apresentado na Figura 4.5.

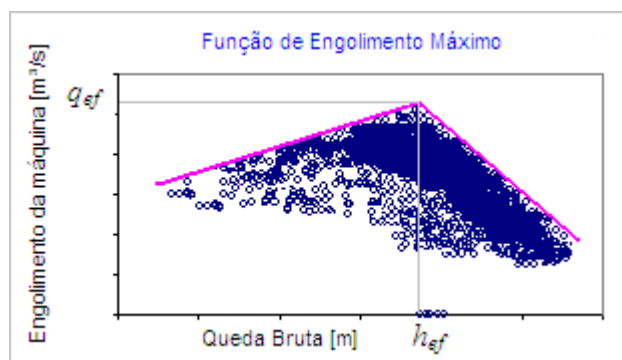


Figura 4.5 Ajuste da função de engolimento máximo para uma máquina.

- **Valor de vazão turbinada total da usina com conhecimento do número de máquinas:** as empresas que dispõem do valor de vazão turbinada total da usina, com conhecimento do número de máquinas em operação, podem ajustar a função de

engolimento máximo grafando os pontos de vazão turbinada da usina, dividida pelo número de máquinas em operação, em função da altura de queda bruta. Novamente, a curva de engolimento máximo será determinada como uma envoltória sobre a nuvem de pontos medidos. Como resultado, obtêm-se os mesmos valores de queda e engolimento efetivos para todas as máquinas da usina, Figura 4.6.

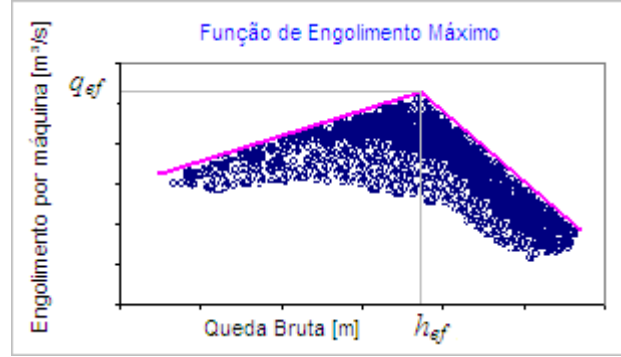


Figura 4.6 Ajuste da função de engolimento máximo para todas as máquinas da usina.

Quando o valor do engolimento máximo oficial é maior ou menor do que o consolidado, os modelos de planejamento e programação da operação podem não alcançar a meta de geração, a não ser que subestimem ou superestimem, respectivamente, o rendimento das máquinas.

4.2.6 Função de Rendimento Global

A matriz de rendimento global de uma usina pode ser calculada a partir da tabela que relaciona potência, queda bruta e vazão turbinada, obtida segundo o algoritmo da Figura 2.12. Para cada trio dessas variáveis, calcula-se o rendimento global η^G , conforme a Equação 4.5.

$$\eta^G = \frac{p}{k \cdot h_b \cdot q} \quad (4.5)$$

Usando a ferramenta Solver do Excel é possível ajustar as células da matriz de rendimento global com base nos dados de operação registrados pela usina. Para isso, a função objetivo é otimizar as células dessa matriz de modo a minimizar a soma do erro quadrático entre o rendimento global, implícito na base de dados, e o rendimento global calculado usando essa nova matriz, Equação 4.6.

Objetivo:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{num} (\eta^G_i - \eta^{G*}_i)^2 \quad (4.6)$$

Sujeito a:

$$\min \leq \eta^G_{l,c} \leq \max$$

onde:

num é o número de operações registradas na base de dados da usina;

i é o índice da operação registrada na base de dados da usina;

η^G_i é o rendimento global da usina, implícito na base de dados, para a potência, queda bruta e vazão turbinada do registro de índice i ;

η^{G*}_i é o rendimento global da usina, calculado usando a matriz de rendimento global, para a potência e queda bruta do registro de índice i ;

$\eta^G_{l,c}$ é o rendimento global da usina na célula de linha l e coluna c da matriz;

$\min$ é o menor valor aceitável para o rendimento global;

$\max$ é o maior valor aceitável para o rendimento global.

Portanto, deve-se preencher a caixa de diálogo *Parâmetros do Solver* da seguinte forma.

- **Célula de destino:** neste campo, coloca-se o endereço da célula que armazena o valor cujo objetivo é minimizar, ou seja, a soma do erro quadrático entre os rendimentos globais.
- **Células variáveis:** este campo é preenchido com o intervalo de células cujo conteúdo é a matriz de rendimento global.
- **Submeter às restrições:** neste campo deve ser imposta a restrição de que as células variáveis devem ser maiores que $\min$ e menores que $\max$.

O resultado desse problema de otimização é uma matriz de rendimento global ajustada às variáveis de potência, queda bruta e vazão turbinada registradas na base de dados.

Nos modelos de planejamento da operação hidrelétrica, costuma-se utilizar um rendimento médio para a usina. Pode-se determinar o rendimento global médio da usina $\bar{\eta}^G$, com base nos dados de operação, usando a Equação 4.7.

$$\bar{\eta}^G = \frac{1}{num} \sum_{i=1}^{num} \eta_i^G \quad (4.7)$$

Com o objetivo de auxiliar na compreensão dos procedimentos apresentados, no capítulo seguinte, a metodologia completa será aplicada a uma usina hidrelétrica brasileira.

Em branco

Capítulo 5

Estudo de Caso

Neste capítulo, apresenta-se a aplicação da metodologia proposta a uma usina hidrelétrica que faz parte do SIN e opera sob a coordenação e controle do ONS. Primeiro é feita a análise da coerência do conteúdo do banco de dados. Em seguida, as funções que descrevem as características físicas da usina são consolidadas com base nos registros coerentes de operação. As ferramentas apresentadas no Capítulo 3 são utilizadas nas duas etapas.

5.1 Características do Cenário

A metodologia proposta foi aplicada aos dados de algumas empresas brasileiras de geração de energia hidrelétrica. Os procedimentos fizeram uso do gerenciador de dados HydroData, do construtor de consultas HydroConsulta, do simulador da operação de usinas hidrelétricas HydroSim e da ferramenta Solver do Excel. Em geral, o HydroData foi utilizado para fornecer os dados físicos da usina e o cenário de pós-operação. O HydroConsulta foi responsável por executar consultas na base de dados e extrair dela as variáveis de operação. O HydroSim foi empregado para conferir o balanço hídrico do reservatório. A ferramenta Solver do Excel foi utilizada para a calibração da curva colina de rendimento global.

Será apresentada a aplicação da metodologia a uma usina que faz parte do SIN e opera sob a coordenação e controle do ONS. O período analisado corresponde a sete anos de operação da usina, de 01/01/2000 a 01/01/2007. Esse período equivale a um total de 61.392 registros horários na base de dados.

5.2 Análise da Coerência da Base de Dados

A análise da coerência da base de dados será apresentada na mesma sequência do capítulo anterior. Inicialmente é observada a coerência entre os dados de operação. Na sequência, é examinada a coerência dos dados de operação com os limites da usina para armazenamento, defluência e geração. Por fim, avalia-se a coerência dos dados de operação com a realidade física. Portanto, os testes apresentados referem-se à consistência: da queda bruta, da vazão defluente, da vazão vertida, do balanço hídrico, dos limites de operação, da vazão afluente e dos rendimentos médio e global variável. Estes testes são apresentados na sequência.

5.2.1 Consistência da Queda Bruta

O HydroConsulta foi usado com a finalidade de listar os registros de queda bruta inconsistente. As abas Selecionar, Condições e Classificação foram preenchidas de maneira a obter o resultado esperado.

Na Figura 5.1, apresenta-se o comando SQL automaticamente gerado pelo HydroConsulta, para essa análise. De acordo com esse comando, o usuário optou por listar os campos: *Data*, *Hora* e *Queda_Bruta*. Estes campos pertencem à tabela chamada *Operacao*. Segundo o filtro dessa consulta, serão listados os registros de queda bruta inconsistente para o período de 01/01/2000 a 01/01/2007. São inconsistentes os registros cujo conteúdo do campo *Queda_Bruta* é negativo ou não corresponde à diferença entre os campos *NA_Mont* e *NA_Jus*.

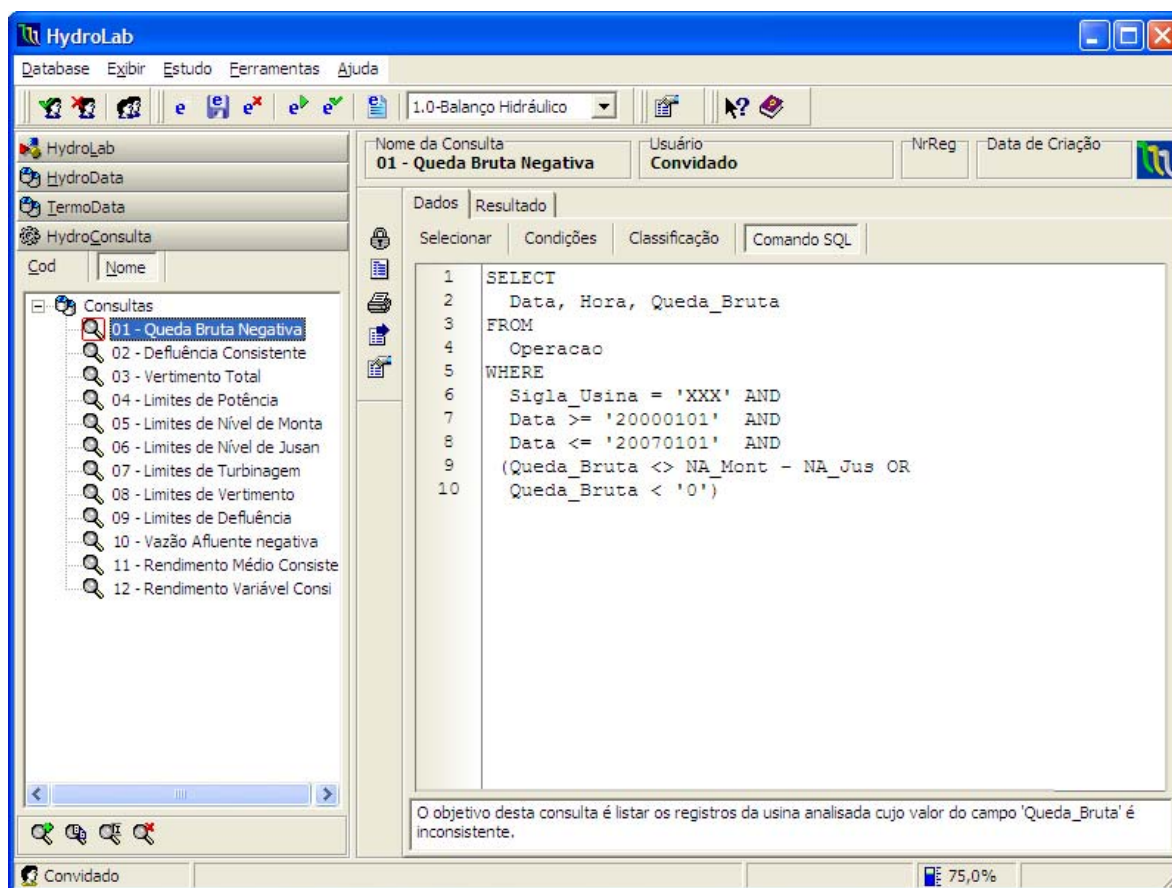


Figura 5.1 Comando SQL, automaticamente gerado pelo HydroConsulta, para listar os registros de queda bruta inconsistente da usina analisada.

Na Figura 5.2, exibe-se o resultado da consulta. Todos os valores analisados de queda bruta são coerentes com a diferença entre o nível de montante e de jusante. No entanto, dos 61.392 registros da base, 11 armazenam valores negativos para essa variável. Esses registros ocorreram no ano de 2006, entre os meses de maio, julho e outubro; em horários variados. Essas informações inconsistentes devem ser desprezadas na fase de consolidação efetiva das funções.

The screenshot shows the HydroLab software interface. On the left, a tree view under 'Consultas' lists various queries, with '01 - Queda Bruta Negativa' selected. The main window displays a table of results with columns 'Data', 'Hora', and 'Queda_Bruta'. The table contains 11 records. Below the table, it states 'Resultado: 11 registro(s)'. The status bar at the bottom shows the user 'Convidado' and a zoom level of 65,2%.

Data	Hora	Queda_Bruta
20060504	19:00	-124
20060504	20:00	-124
20060504	21:00	-125
20060504	22:00	-125
20060509	19:00	-2296
20060514	09:00	-7025
20060530	10:00	-47
20060719	13:00	-2608
20060719	14:00	-2613
20060719	15:00	-2614
20061026	01:00	-2409

Figura 5.2 Lista dos registros de queda bruta negativa da usina analisada.

5.2.2 Consistência da Vazão Defluente

Para avaliar a consistência da vazão defluente, novamente o HydroConsulta foi utilizado. O objetivo da consulta é listar os registros da usina analisada, cujo conteúdo do campo que armazena o valor da vazão defluente é diferente da soma das vazões computadas como saída do aproveitamento.

O comando SQL automaticamente gerado pelo sistema é apresentado na Figura 5.3. De acordo com esse comando, o usuário optou por listar os campos: *Data*, *Hora*, *V_Defl*, *V_Turb*, *V_Vert*, *V_Eclu* e *V_Psic*. Estes campos também pertencem à tabela chamada *Operacao*. Segundo o filtro dessa consulta, serão listados os registros de vazão defluente inconsistente para o período de 01/01/2000 a 01/01/2007.

Todos os registros do período analisado são coerentes para essa questão, assim, nenhum registro foi apresentado como resultado dessa consulta. No entanto, é importante notar que os modelos computacionais que fazem uso da vazão vertida devem ler, nessa base

de dados, não apenas o campo V_{Vert} , mas também os campos V_{Eclu} e V_{Psic} , pois estas vazões também são liberadas pela usina sem gerar energia.

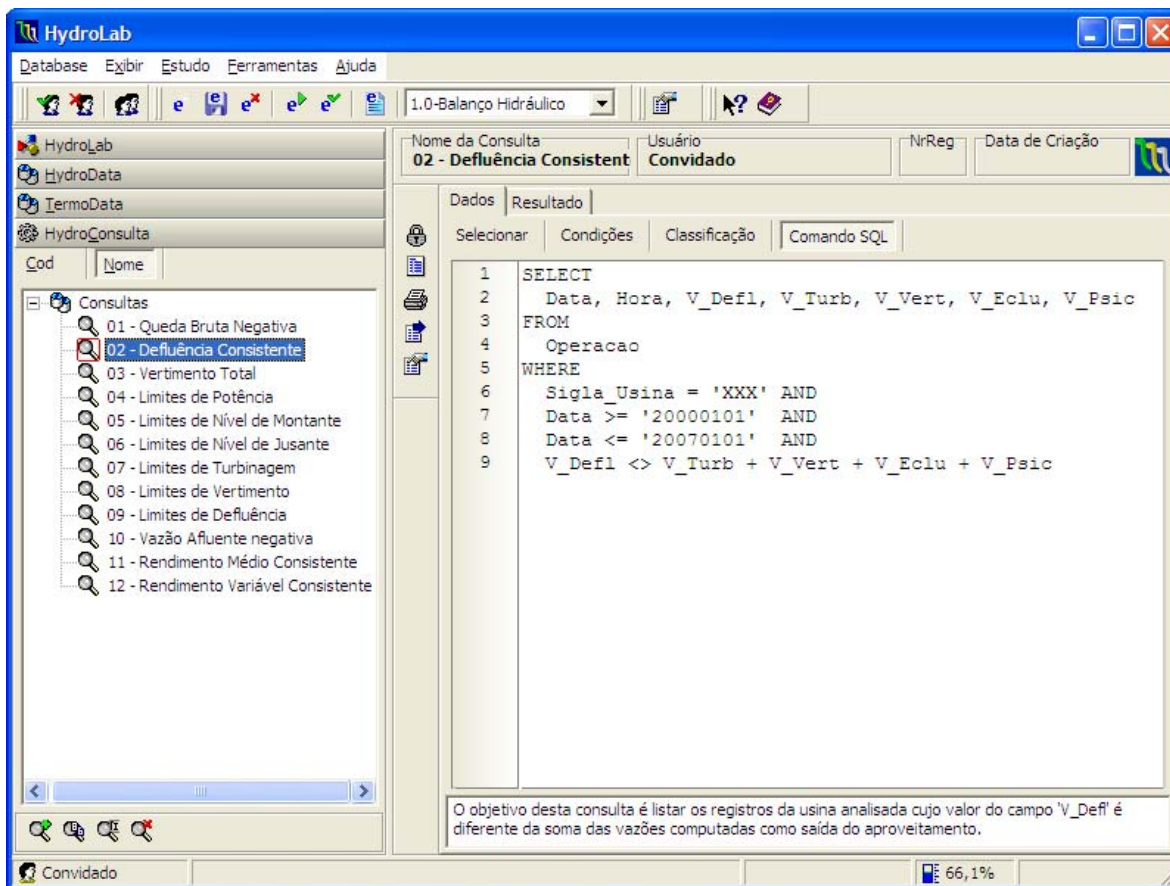


Figura 5.3 Comando SQL, automaticamente gerado pelo HydroConsulta, para listar os registros que apresentam inconsistência da vazão defluente em relação às vazões computadas como saída do aproveitamento.

5.2.3 Consistência da Vazão Vertida

Para avaliar a consistência da vazão vertida, o HydroConsulta deve buscar os registros da usina analisada cujo campo que armazena o valor da vazão vertida total é incoerente com a soma dos três tipos de vertimento registrados pela usina: soleira livre, descarregador de fundo e tipo válvula.

O comando SQL, apresentado na Figura 5.4, indica que o usuário optou por listar os campos: $Data$, $Hora$, V_{Vert} , $Vert_{SL}$, $Vert_{DF}$ e $Vert_{VA}$, também pertencentes à tabela $Operacao$. Segundo o filtro dessa consulta, serão listados os registros inconsistentes de vazão vertida para o período de 01/01/2000 a 01/01/2007 de operação da usina. Os registros

serão apresentados em ordem ascendente dos campos *Data* e *Hora*, para complementar a análise dos resultados.

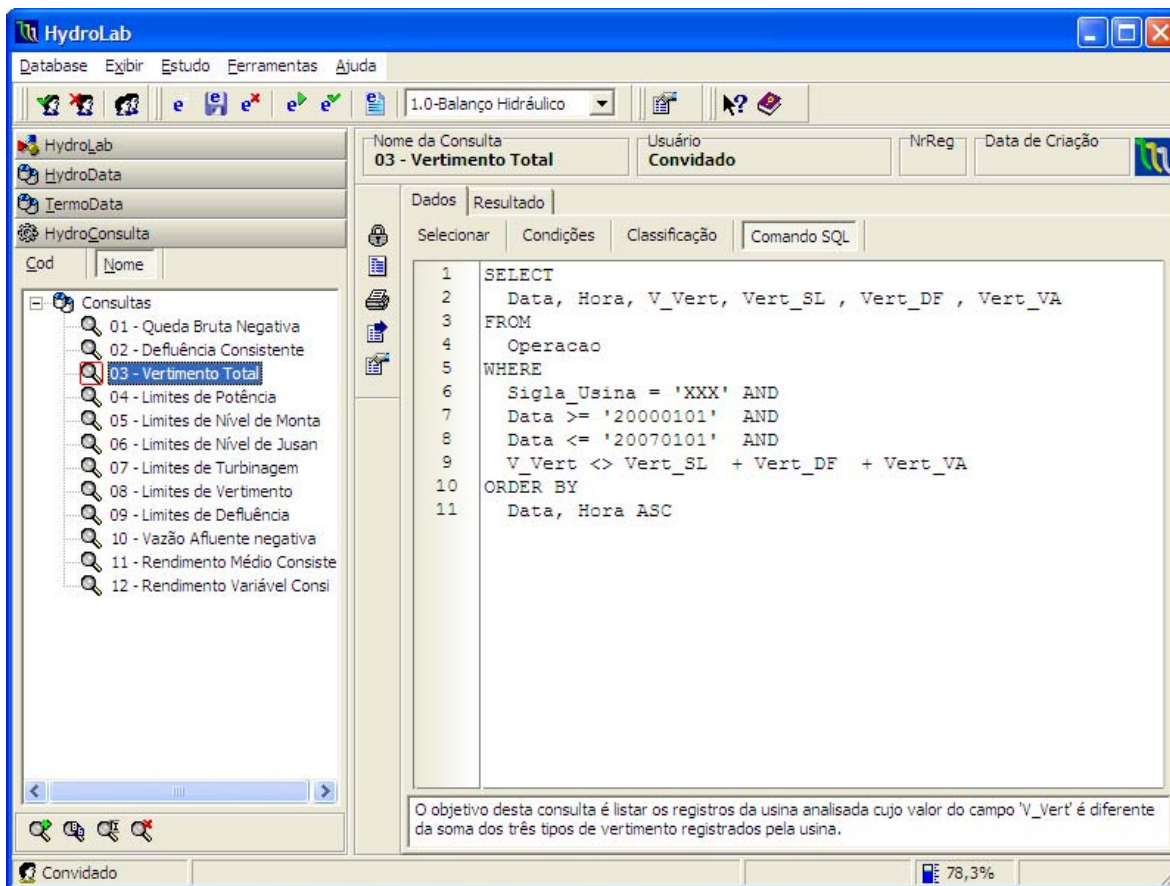


Figura 5.4 Comando SQL, automaticamente gerado pelo HydroConsulta, para listar os registros que apresentam inconsistência da vazão vertida total em relação à soma dos três tipos de vertimento registrados pela usina.

Na Figura 5.5, exibe-se o resultado dessa consulta. Dos 61.392 registros da base, 7.145 armazenam valores de vazão vertida total diferente da soma dos três tipos de vertimento registrados pela usina. Esses registros ocorreram de 06/2000 a 12/2001. Percebe-se que, com exceção dos cinco primeiros registros, todos possuem valor nulo para os campos *Vert_SL*, *Vert_DF* e *Vert_VA*. Isso significa que, apenas a partir de 12/2001 a usina começou a registrar separadamente os valores de vazão vertida. Ou seja, essa inconsistência pode ser contornada, pois quando é preciso buscar na base de dados o valor de vazão vertida, deve-se ler o campo *V_Vert* ao invés da soma dos campos *Vert_SL*, *Vert_DF* e *Vert_VA*, pelo menos para os anos de 2000 e 2001. Portanto, esses registros não serão excluídos da etapa de consolidação efetiva das informações.

Data	Hora	V_Vert	Vert_SL	Vert_DF	Vert_VA
20000618	01:00	60	30	10	0
20000618	02:00	60	30	10	0
20000618	03:00	4210	30	4160	0
20000618	04:00	4210	30	4160	0
20000618	05:00	4210	30	4160	0
20000618	11:00	5432	0	0	0
20000618	12:00	5432	0	0	0
20000618	13:00	5432	0	0	0
20000618	14:00	5432	0	0	0
20000618	15:00	5432	0	0	0
20000618	16:00	5432	0	0	0
20000618	17:00	5432	0	0	0
20000618	18:00	5432	0	0	0
20000618	19:00	5432	0	0	0
20000618	20:00	5432	0	0	0
20000618	21:00	5432	0	0	0
20000618	22:00	5432	0	0	0
20000618	23:00	5432	0	0	0
20000618	24:00	5432	0	0	0
20000619	01:00	5432	0	0	0
20000619	02:00	5432	0	0	0

Figura 5.5 Lista dos registros inconsistentes de vazão vertida total.

5.2.4 Consistência do Balanço Hídrico

Como mencionado anteriormente, o simulador HydroSim pode ser usado para conferir o balanço hídrico das variáveis de vazão e volume que compõem a operação da usina. Para essa finalidade, deve-se conhecer o volume inicial do reservatório e as trajetórias de vazão afluente e defluente da usina, para o período analisado, conforme ilustração apresentada na Figura 5.6.

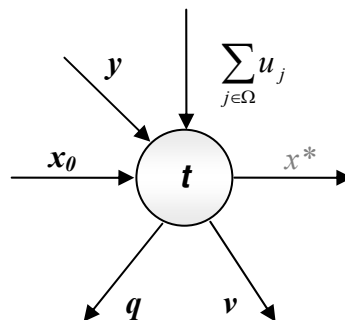


Figura 5.6 Em negrito, dados fornecidos como entrada ao simulador para conferência do balanço hídrico.

A cada intervalo simulado, será calculado o volume final do reservatório, o qual será inicial no intervalo seguinte. O balanço hídrico estará correto se a trajetória de armazenamento simulada for igual à registrada. Essa comparação pode ser feita de forma gráfica ou numérica utilizando além do HydroSim, o HydroData.

A trajetória de armazenamento registrada pode ser visualizada na aba *Pós-Operação* do HydroData, Figura 5.7. A trajetória de armazenamento recalculada pelo simulador é apresentada na aba *Resultados* do HydroSim, Figura 5.8. Em ambos os módulos a forma gráfica da trajetória encontra-se na sub-aba *Por Usina* e a forma numérica localiza-se na sub-aba *Planilhas*.

O sistema HydroLab possibilita a comparação de gráficos apresentados em diferentes módulos. Para isso devem ser seguidos dois passos. Inicialmente, deve-se abrir o primeiro gráfico em uma nova janela usando o menu de atalho *Abrir em Outra Janela*, conforme a Figura 5.7. Em seguida, ativa-se a comparação do segundo gráfico usando o menu de atalho *Ativar Comparação*, Figura 5.8, e arrasta-se a trajetória para a nova janela.

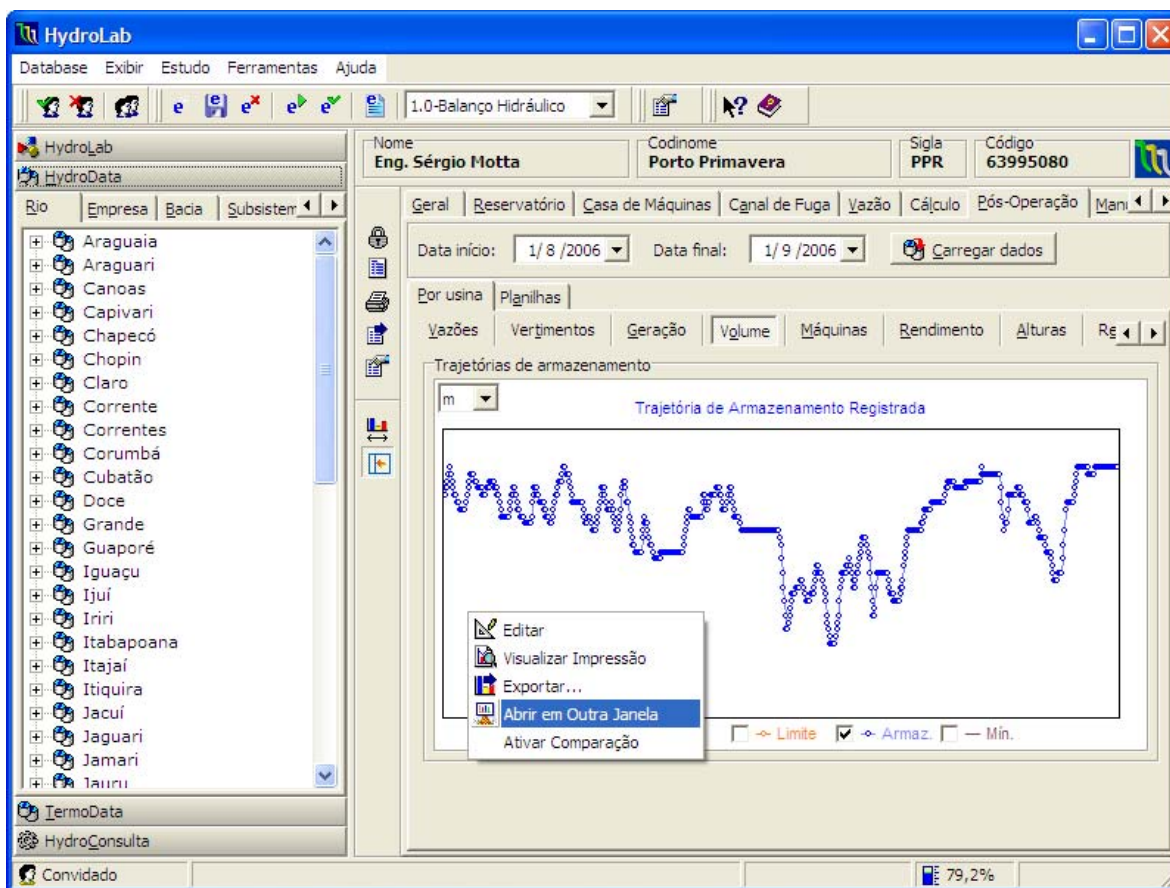


Figura 5.7 Trajetória de armazenamento registrada apresentada pelo HydroData.

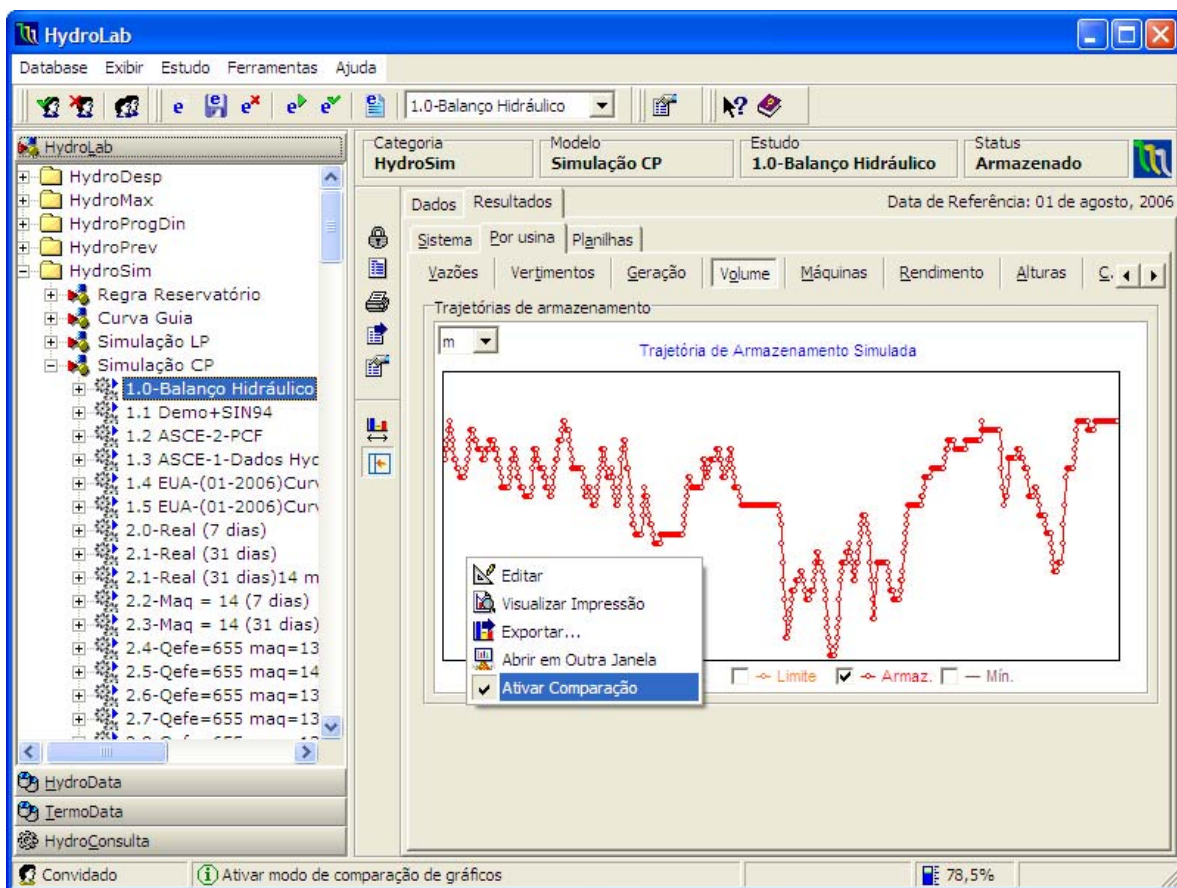


Figura 5.8 Trajetória de armazenamento simulada apresentada pelo HydroSim.

Usando o HydroSim e o HydroData o balanço hídrico da usina analisada foi conferido para o período de 01/01/2000 a 01/01/2007. Tanto a análise numérica quanto a análise gráfica das trajetórias de armazenamento indicam que o cálculo de conservação de água dos reservatórios está correto.

5.2.5 Consistência com os Limites de Operação

O HydroData e o HydroConsulta foram utilizados para verificar a consistência dos dados registrados na base em relação aos limites de operação do reservatório, do canal de fuga e dos equipamentos da usina. O HydroData forneceu as informações de limite inferior e superior das variáveis examinadas. O HydroConsulta foi responsável pela consulta à base de dados em busca de registros inconsistentes.

Na Tabela 5.1, apresenta-se a violação do limite inferior e superior para o nível de montante, vazão defluente, potência e vazão turbinada no período de 01/01/2000 a

01/01/2007. É apresentada a quantidade de registros que violam as restrições e o grau de violação média dos limites, obtido segundo a Equação 5.1.

$$\delta = \frac{1}{num} \sum_{i=1}^{num} \left(\frac{|a_i - \hat{a}|}{\hat{a}} \right) \cdot 100 \quad (5.1)$$

onde:

δ é o grau de violação média do limite inferior ou superior da variável [%];

a_i é a variável analisada do registro de índice i ;

$\hat{a}$ é o valor do limite inferior ou superior da variável.

Tabela 5.1 Violação dos limites de operação da usina analisada.

Variável	Violação do limite inferior		Violação do limite superior	
	# de registros	δ de violação	# de registros	δ de violação
$\emptyset(x)$	15.962	1%	0	-
u	39	45%	0	-
p	214	valor nulo	5	45%
q	204	valor nulo	655	0,7%

- **Nível de montante:** para os limites mínimo e máximo do nível de montante foram consideradas as informações oficiais do setor elétrico. Do total de registros analisados, 15.962 violam a restrição de nível mínimo em um grau médio de 1%. O valor mais alto de nível de montante encontrado no período analisado é apenas 0,12% mais alto do que o nível mínimo. Isso significa que a usina opera em torno do limite inferior oficial de armazenamento. Essa informação é importante para estabelecer a faixa de validade dos polinômios área x cota e cota x volume.
- **Vazão defluente:** para os limites mínimo e máximo de vazão defluente também foram consideradas as informações oficiais. Do total de registros analisados, 39 violam a restrição de defluência mínima em um grau médio de 45%, no ano de 2001. O grau de violação dessa restrição é alto porque em 9 registros o valor da vazão defluente é nulo. Sem considerar os valores nulos, esse grau de violação se reduz para 29%. Nenhum registro do período analisado viola a restrição de defluência máxima oficial. A informação dos limites da vazão defluente pode ser utilizada na definição da faixa de validade do polinômio cota x defluência.

- **Potência:** uma vez que o limite inferior de potência da usina analisada não é conhecido, foi criada uma consulta que retorna os registros de geração nula. Foram listados 214 registros nessa condição, entre os anos de 2000 a 2005. Para o limite superior, foi considerado o produto do número de máquinas da usina pelo valor da potência efetiva oficial. O resultado dessa consulta apresentou 5 registros cujo grau de violação média é de 45%. Essa violação de limite superior acontece uma vez a cada ano, no mês de fevereiro, às 24:00 horas do dia que termina o horário de verão. Isso acontece porque a usina registra, num único horário, a soma da geração de dois intervalos. Para a consolidação da função de potência máxima, deve-se dividir por 2 o valor de geração verificada desses registros.
- **Vazão turbinada:** o limite inferior de vazão turbinada também não é conhecido. Logo, foi criada uma consulta que retorna os registros de turbinagem nula. Foram listados 204 registros nessa condição, no mesmo período em qual foram encontrados registros de geração nula. Se 214 registros possuem geração nula e 204 apresentam turbinagem nula, isso significa que em 10 registros a usina turbinou sem gerar energia, caracterizando inconsistência nos dados. Esses registros devem ser desprezados na consolidação das funções de potência máxima e engolimento máximo. Para o limite superior, foi considerado o produto do número de máquinas da usina pelo valor de engolimento efetivo oficial. O resultado dessa consulta apresentou 655 registros cujo grau de violação média é de 0,7 %, entre os anos de 2003 a 2006. Esses registros devem ser mantidos, pois indicam que o valor oficial do engolimento efetivo pode estar subestimado.

5.2.6 Consistência da Vazão Afluente

Caso a usina possua registros de vazão afluyente negativa, deve-se avaliar o valor médio diário ou mensal dessa variável. Em reservatórios pequenos e médios o efeito da oscilação do nível de montante no cálculo da vazão afluyente, que resulta em valores negativos, é diluído nas médias diárias. Em grandes reservatórios poderão ocorrer valores de vazão afluyente negativas em intervalos de tempo até mensais.

Usando o HydroConsulta, a primeira busca à base de dados listou 2.401 registros horários de vazão afluyente negativa no período de 01/01/2000 a 01/01/2007. Então, uma

segunda consulta foi criada para listar as médias diárias de vazão afluente nesse mesmo período.

Na Figura 5.9, apresenta-se o comando SQL responsável por essa consulta. Vê-se que o usuário optou por listar a data e o valor médio da vazão afluente, no período analisado. Ambos pertencem à tabela *Operacao*. Os valores médios de vazão afluente são obtidos com o auxílio do comando *AVG* (linha 2). O agrupamento desses valores por data é conseguido pelo uso da cláusula *Group By Data* (linhas 9 e 10).

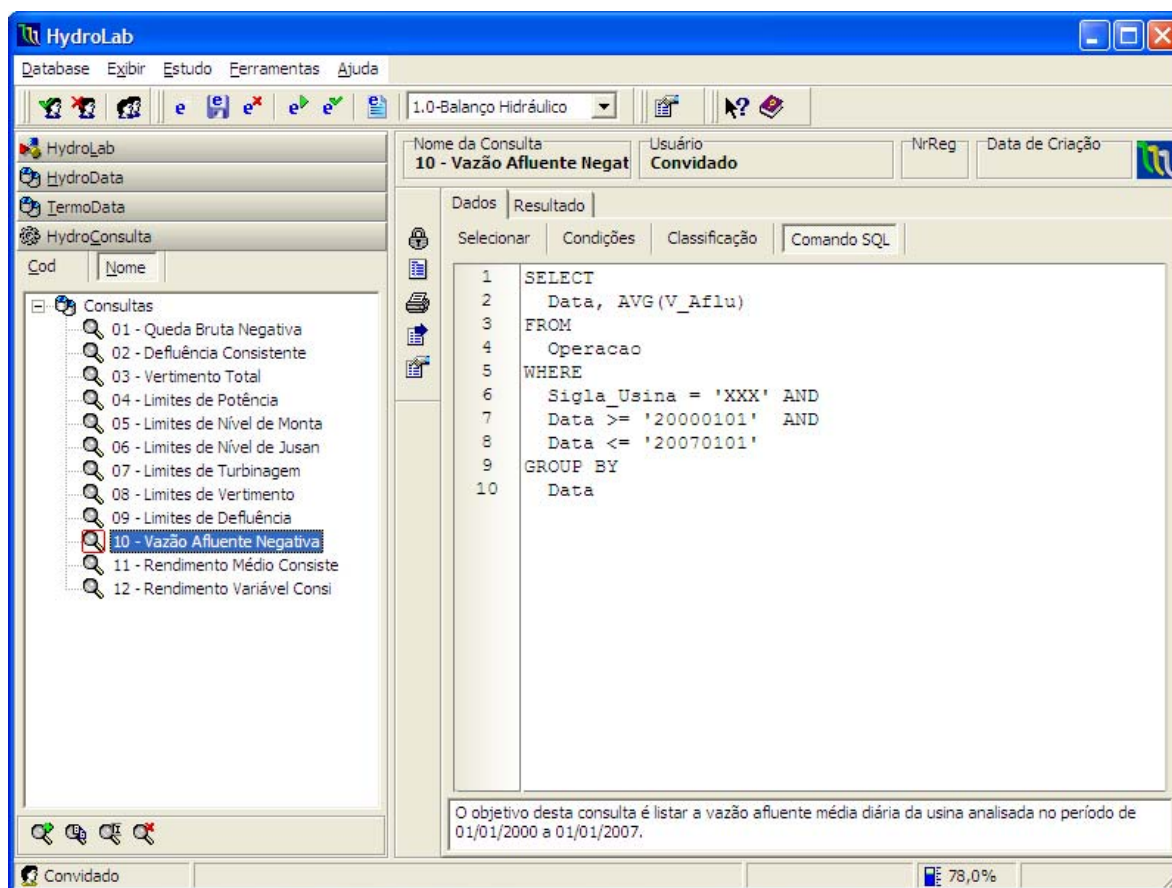


Figura 5.9 Comando SQL, automaticamente construído pelo sistema, para listar os valores médios diários de vazão afluente à usina analisada.

Na Figura 5.10, exibe-se o resultado da consulta. Analisando essa figura, percebe-se que todos os valores médios diários de vazão afluente são positivos. Portanto, os 2.401 registros horários de vazão afluente negativa refletem uma oscilação considerável no nível de montante, mas não asseguram uma inconsistência nos dados. Esses registros podem ser utilizados na etapa de consolidação das funções que descrevem as características físicas da usina.

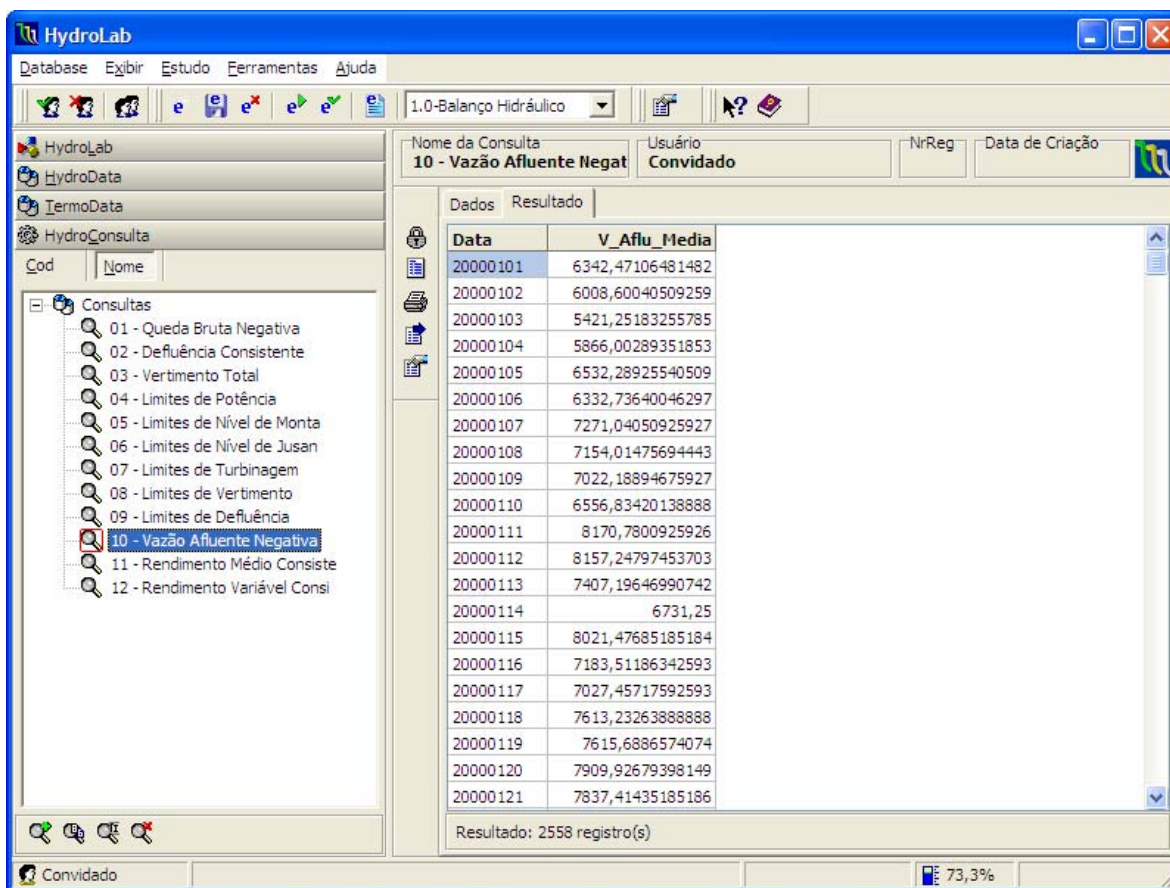


Figura 5.10 Lista das vazões afluentes médias diárias.

5.2.7 Consistência dos Rendimentos Médio e Global Variável

Usando o HydroConsulta é possível listar e avaliar os valores de rendimento médio e rendimento global variável da usina. Nas Figuras 5.11 e 5.12 são apresentados os comandos SQL responsáveis por extrair da base de dados essas informações.

De acordo com o comando apresentado na Figura 5.11, o rendimento médio da usina é apresentado como o conteúdo do campo que armazena a produtividade específica dividido pela constante k , cujo valor é 0,00981.

```

1  SELECT
2      Prod_Espec / 0.00981
3  FROM
4      Usinas
5  WHERE
6      Sigla_Usina = 'XXX'

```

Figura 5.11 Comando SQL gerado pelo HydroConsulta para apresentar o rendimento médio da usina analisada.

O comando SQL apresentado na Figura 5.12 calcula o rendimento global variável da usina baseado nos valores de potência gerada, queda bruta e vazão turbinada de cada registro do período analisado. A fim de evitar o problema de divisão por zero, foram acrescentados os filtros que testam o conteúdo dos campos *Queda_Bruta* e *V_Turb*.

```

1  SELECT
2      Geração/ (0.00981*(Queda_Bruta/100)*V_Turb)*100
3  FROM
4      Operacao
5  WHERE
6      Sigla_Usina = 'XXX' AND
7      Data >= '20000101' AND
8      Data <= '20070101' AND
9      Queda_Bruta <> 0 AND
10     V_Turb <> 0

```

Figura 5.12 Comando SQL gerado pelo HydroConsulta para listar os valores de rendimento global variável da usina.

O valor do rendimento médio da usina analisada, listado pelo HydroConsulta, foi de 90%. Quanto ao rendimento global variável, dos 61.392 registros examinados, 31 possuem um rendimento inferior a 73% e 539 têm um rendimento superior a 94%. Na Figura 5.13, demonstra-se a distribuição da frequência do rendimento global variável da usina no período observado.

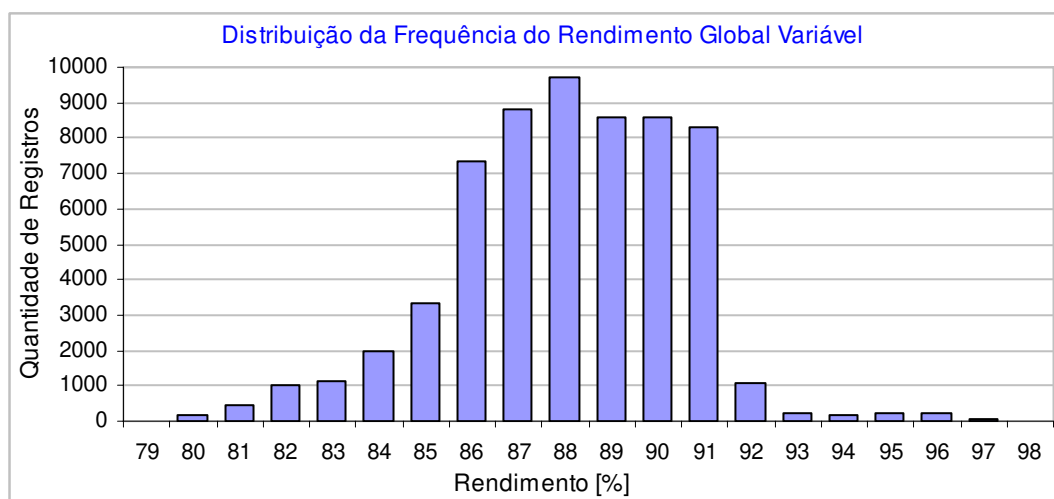


Figura 5.13 Distribuição da frequência do rendimento global variável da usina no período de 01/01/2000 a 01/01/2007.

Para a calibração da curva colina global é recomendável desprezar os registros cujo rendimento global da usina é incoerente com a realidade física.

Após finalizar essa etapa de conhecimento da estrutura da base de dados e da qualidade das informações registradas, é possível definir os registros que devem ser eliminados da fase seguinte, na qual o objetivo é a consolidação efetiva das funções.

5.3 Consolidação Efetiva das Funções

Os procedimentos para a consolidação efetiva das funções baseiam-se nos registros coerentes da base de dados. Para a usina analisada, são apresentadas as consolidações: dos polinômios área $\times$ cota, cota $\times$ volume e cota de jusante $\times$ defluência e das funções de potência máxima, engolimento máximo e rendimento global.

5.3.1 Polinômio Área $\times$ Cota

Para a consolidação do polinômio área $\times$ cota foram utilizados os dados apresentados na Tabela 5.2. Os valores de área em destaque foram calculados por interpolação linear. Os demais valores são dados de projeto da usina.

Tabela 5.2 Pontos “área $\times$ cota” consolidados.

Nível Característico	Área (km ²)	Cota (m)
	185,2	323,2
	265,2	325,2
	485,2	330,2
	985,2	335,2
	1923,2	340,2
Mínimo	2129,2	342,2
Máximo	2160,1	342,5
Maximorum	2407,3	344,9
	2438,2	345,2
Coroamento	2718,4	348,2
	2905,2	350,2

Foi ajustado um polinômio aos pontos “área $\times$ cota” da Tabela 5.2. Na Figura 5.14, compara-se o polinômio oficial e consolidado. O desvio entre eles tem impacto no cálculo da evaporação do reservatório, utilizado nos modelos de planejamento da operação hidrelétrica.

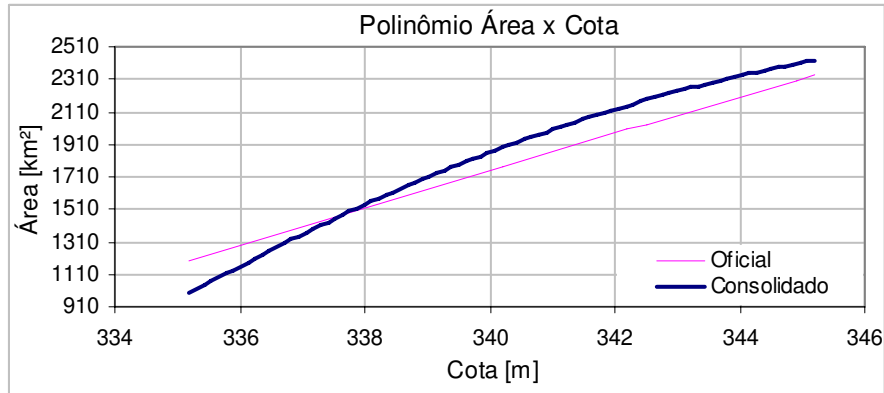


Figura 5.14 Consolidação do polinômio área x cota.

5.3.2 Polinômio Cota x Volume

Para a consolidação do polinômio cota x volume foram recalculados os volumes do reservatório, para cada par “área x cota” da Tabela 5.2, segundo a Equação 4.4. O resultado é apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Pontos “área x cota x volume” consolidados.

Nível Característico	Área (km ²)	Cota (m)	Volume (hm ³)
	185,2	323,2	85,2
	265,2	325,2	365,2
	485,2	330,2	1815,2
	985,2	335,2	5065,2
	1923,2	340,2	11910,2
Mínimo	2129,2	342,2	15792,2
Máximo	2160,1	342,5	16410,0
Maximorum	2407,3	344,9	21686,4
	2438,2	345,2	22387,7
Coroamento	2718,4	348,2	29867,0
	2905,2	350,2	35320,2

Foi ajustado um polinômio aos pontos “cota x volume” da Tabela 5.3. Na Figura 5.15, compara-se o polinômio oficial e consolidado. A diferença entre eles reflete-se no cálculo do balanço hídrico do reservatório da usina. Como consequência, as vazões afluentes registradas na base tornam-se comprometidas e precisam ser recalculadas.

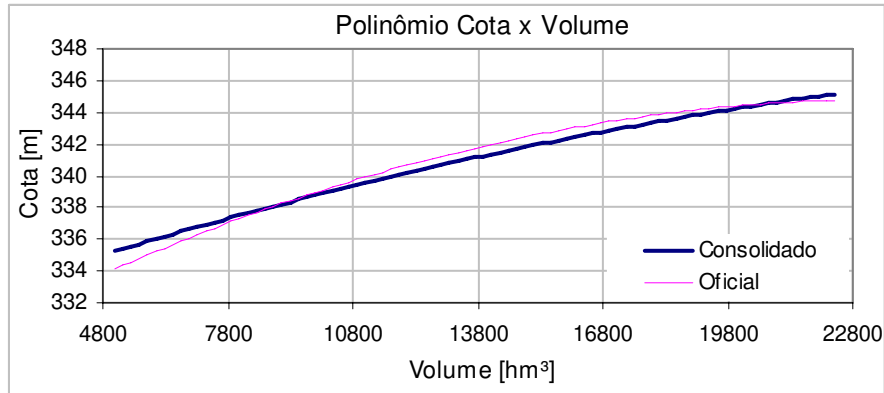


Figura 5.15 Consolidação do polinômio cota x volume.

5.3.3 Polinômio Cota de Jusante x Defluência

Para a consolidação do polinômio cota de jusante x defluência, primeiro foi ajustado um polinômio à nuvem de pontos “nível de jusante x vazão defluente”, construída a partir da consulta à base de dados de operação. De acordo com a nuvem de pontos, a faixa de validade desse polinômio era de 322,45 m até 326,58 m. Esse polinômio precisava ser extrapolado até a capacidade máxima do vertedor, 51.423 m³/s. Porém, não havia registros na base para o intervalo de 326,59 m até 329,71 m. Então, foram adicionados os pontos do polinômio oficial para esse intervalo sem registro e um segundo polinômio foi ajustado para a faixa completa, Figura 5.16. O benefício dessa técnica de ajuste é a obtenção de um único polinômio, o qual é, ao mesmo tempo, coerente para os pontos “nível x vazão” da base e coerente para o intervalo no qual não há registros de operação.

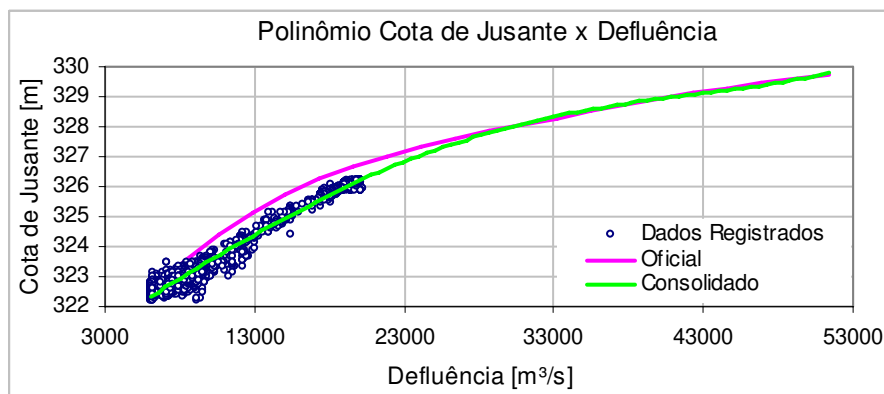


Figura 5.16 Consolidação do polinômio cota de jusante x defluência.

Observando a Figura 5.16, nota-se que o polinômio oficial tem quase toda a sua trajetória fora da nuvem de pontos. Isso causa erros na queda bruta calculada pelos modelos

de planejamento e programação da operação, comprometendo o resultado matemático da função de produção, Equação 2.2. Nessa situação específica, na qual o polinômio cota de jusante x defluência oficial mantém-se acima dos pontos registrados, a tendência de um simulador da operação de usinas hidrelétricas é turbinar uma quantidade de água maior do que a verificada na operação real, a fim de compensar a diminuição da queda líquida e, dessa forma, aproximar-se da meta de geração elétrica.

5.3.4 Função de Potência Máxima

O ajuste da função de potência máxima foi feito sem o conhecimento do número de máquinas em operação, pois no caso específico dessa usina, essa informação não está disponível na base de dados. Observando a Figura 5.17, pode-se supor o número de máquinas ligadas, de forma empírica, uma vez que visualmente se formam agrupamentos de pontos indicativos dessa situação. Nessa figura, os pequenos círculos representam os pares “potência verificada x queda bruta” registrados no banco de dados, em base horária. A linha cheia, no topo do gráfico, ilustra os valores oficiais de queda e potência efetiva do conjunto de máquinas do aproveitamento. O traço consolidado superior representa o limite operativo da usina, no período analisado. O traço consolidado inferior sugere que uma máquina encontra-se parada.

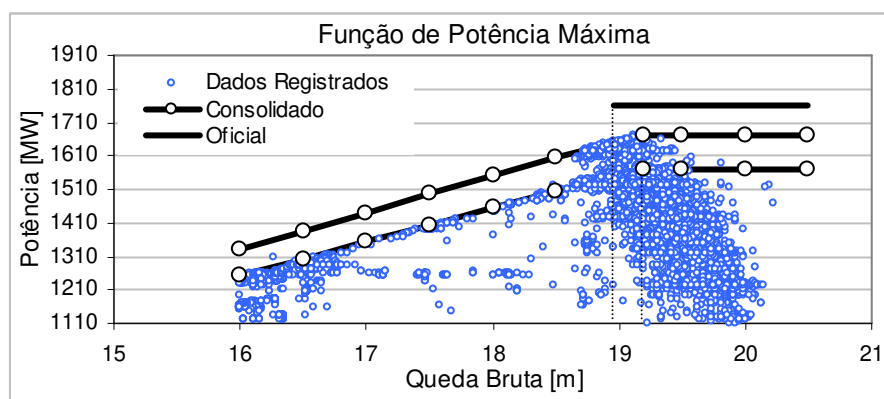


Figura 5.17 Consolidação da função de potência máxima.

Analisando o gráfico, percebe-se que o valor de potência máxima oficial não foi atingido pela usina, no período analisado, nem mesmo quando provavelmente todas as máquinas estavam em operação na queda efetiva. Caso essa inconsistência se verifique,

pode-se impor um risco ao sistema, pois a empresa acredita que possui uma disponibilidade de geração que não é real.

5.3.5 Função de Engolimento Máximo

O ajuste da função de engolimento máximo também foi feito sem a informação do número de máquinas em operação. Novamente, tentou-se supor o número de máquinas ligadas pela disposição dos pontos na Figura 5.18. Nessa figura, os pequenos círculos representam os pares “vazão turbinada $\times$ queda bruta” registrados pela usina. O círculo cheio, próximo ao cruzamento das retas, ilustra os valores oficiais de queda e engolimento efetivo do aproveitamento quando um conjunto turbina/gerador não está em funcionamento. Os traços consolidados representam o limite operativo da usina, no período analisado, quando provavelmente uma de suas máquinas estava parada. Os pontos acima dos traços indicam registros de operação nos quais todas as máquinas estavam ligadas.

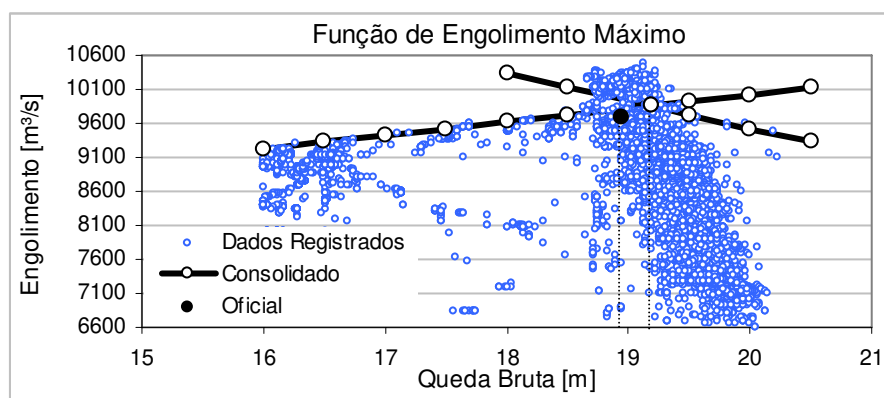


Figura 5.18 Consolidação da função de engolimento máximo.

Analisando o gráfico supõe-se que, para um mesmo número de máquinas em operação, o valor de engolimento máximo oficial é menor do que o engolimento máximo registrado no período analisado. Dessa forma, os modelos de planejamento da operação podem não alcançar a meta de geração, a não ser que superestimem o rendimento das máquinas.

É importante deixar claro que o ajuste das funções de potência máxima e engolimento máximo sem o conhecimento do número de máquinas em operação não é recomendado, pois baseia-se em suposições.

5.3.6 Função de Rendimento Global

Para calcular a matriz de rendimento global, a Equação 4.5 foi aplicada a cada trio da tabela que relaciona potência, queda bruta e vazão turbinada; obtida segundo o algoritmo da Figura 2.12. O resultado é apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 Matriz de rendimento global.

Potência	Queda Bruta											
	0,875	0,876	0,879	0,881	0,883	0,884	0,886	0,886	0,888	0,887	0,886	0,886
	0,858	0,870	0,878	0,884	0,888	0,891	0,893	0,894	0,895	0,896	0,897	0,893
	0,830	0,849	0,867	0,877	0,885	0,891	0,894	0,897	0,899	0,900	0,901	0,901
		0,823	0,846	0,862	0,874	0,883	0,889	0,893	0,897	0,899	0,901	0,903
			0,815	0,837	0,857	0,870	0,879	0,886	0,891	0,895	0,898	0,901
						0,852	0,865	0,875	0,883	0,889	0,893	0,896
							0,846	0,861	0,872	0,880	0,885	0,890
									0,856	0,868	0,876	0,882

Usando a ferramenta Solver do Excel, as células dessa matriz foram ajustadas aos dados registrados na base. A fim de manter a suavidade da curva alguns ajustes manuais foram necessários.

Na Figura 5.19, apresenta-se a curva colina de rendimento da turbina e a curva colina de rendimento global. A fim de facilitar a comparação visual entre elas, as três dimensões de ambos os gráficos possuem as mesmas escalas.

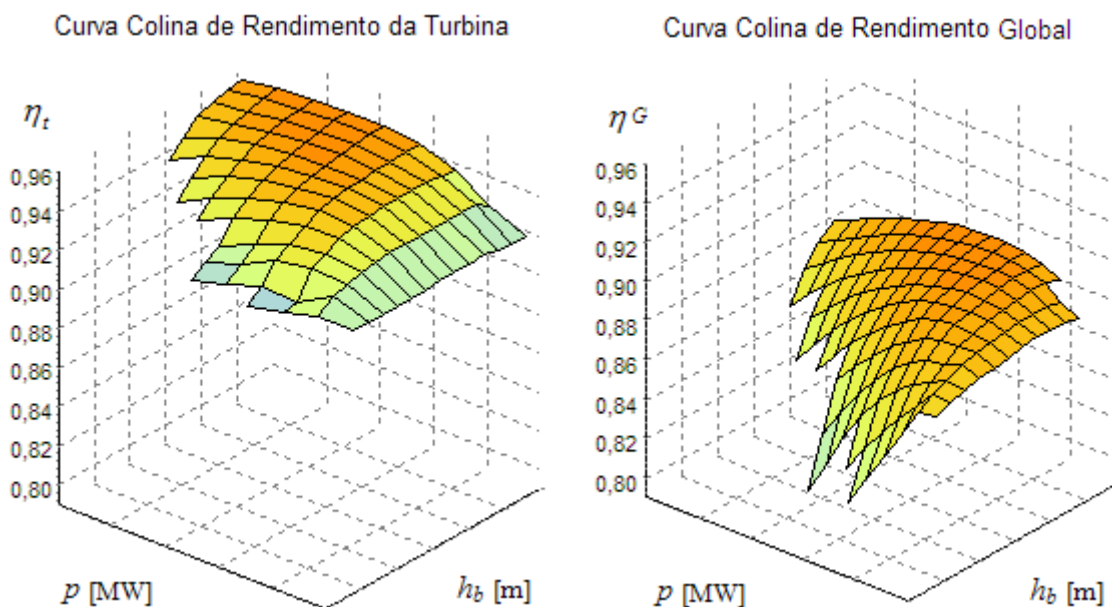


Figura 5.19 Curva colina de rendimento da turbina x rendimento global.

Quanto ao formato, percebe-se que a curva de rendimento da turbina é menos côncava do que a de rendimento global. Quanto à posição, nota-se que a curva de rendimento global é mais baixa do que a de rendimento da turbina. Para melhor compreender as diferenças entre elas, deve-se ter em mente o tipo de função e a estimativa das perdas associadas à turbina, ao gerador e ao circuito hidráulico, apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 Função associada e estimativa das perdas da turbina, do gerador, e do circuito hidráulico.

Item	Função associada	Estimativa das perdas
Turbina	Curva colina	de 4 % a 12 %
Gerador	Em geral é uma constante	de 1 % a 10 %
Circuito hidráulico	Espera-se uma função do 2º grau	de 1 a 5 %

Fonte: Arce (2006)

Conforme mencionado no Capítulo 2, o rendimento global tem como objetivo juntar os três tipos de perdas associadas à operação da usina, numa única função. Portanto, o desenho da curva de rendimento global assemelha-se à forma da curva de rendimento da turbina, acoplada a uma constante (rendimento do gerador) e a uma função do 2º grau (perda hidráulica). Em relação à posição, a curva colina de rendimento global é mais baixa do que a de rendimento da turbina porque incorpora as perdas que ocorrem no gerador e no circuito hidráulico, além das perdas na turbina.

Após consolidar as funções que representam as características físicas da usina analisada, pode-se avaliar o impacto da qualidade dos dados na reprodução da operação da usina nos horizontes de curtíssimo e curto prazo.

Em branco

Capítulo 6

Impacto da Qualidade dos Dados na Reprodução da Operação Hidrelétrica

Neste capítulo, analisa-se o impacto da qualidade dos dados em estudos de reprodução da operação hidrelétrica. As análises são aplicadas à usina cuja consolidação dos dados foi apresentada no capítulo anterior. Os estudos são construídos para os horizontes de curtíssimo e curto prazo. Para o curto prazo, além de observar o impacto da qualidade dos dados, avalia-se a diferença entre utilizar o rendimento global médio e o rendimento global variável da usina.

6.1 Aplicações do Simulador HydroSim

O modelo de simulação HydroSim foi utilizado, neste capítulo, com a finalidade de analisar o impacto da qualidade dos dados na reprodução da operação hidrelétrica. Entre o conjunto de regras operativas disponíveis nesse simulador foi usada a chamada *Decisão por Usina*. Ela pode ser aplicada com dois objetivos: reprodução da trajetória de vazão turbinada ou reprodução da trajetória de geração.

Reprodução da trajetória de vazão turbinada

Quando a meta do simulador é a reprodução da trajetória de vazão turbinada registrada, os dados fornecidos ao HydroSim são: o volume inicial e as trajetórias de geração, de vazão afluente e de vazão vertida, conforme apresentado na Figura 6.1.

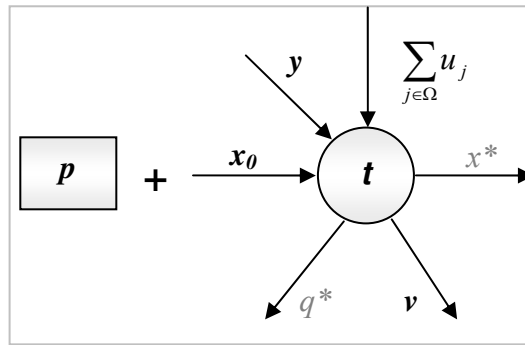


Figura 6.1 Em negrito, dados fornecidos como entrada ao simulador quando a meta é a reprodução da trajetória de vazão turbinada registrada.

Esse tipo de aplicação do simulador tem duas utilidades. A primeira é que ele mostra o impacto da qualidade dos dados na trajetória de armazenamento simulada, pois a cada intervalo, a decisão de turbinagem influencia diretamente no cálculo do volume final do reservatório. A segunda utilidade é que ele pode ser usado para planejar a operação futura porque a meta de geração de um período e as afluências previstas são informações construídas na fase de programação da operação hidrelétrica.

Reprodução da trajetória de geração

Quando o objetivo do simulador é a reprodução da trajetória de geração, os dados fornecidos ao HydroSim são: o volume inicial e as trajetórias de vazão afluente e defluente, conforme ilustrado na Figura 6.2.

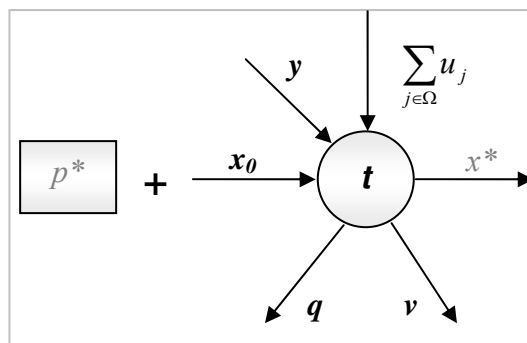


Figura 6.2 Em negrito, dados fornecidos como entrada ao simulador quando o objetivo é a reprodução da trajetória de geração registrada.

Esse tipo de aplicação do simulador também tem dois benefícios. O primeiro é que ele permite conferir o balanço hídrico da usina, pois conhecendo o volume inicial e as vazões, a trajetória de armazenamento simulada deve ser igual à registrada. O segundo benefício é que esse tipo de aplicação não acumula os erros de um intervalo simulado para o próximo porque as inconsistências se refletem apenas na trajetória de geração.

Foram realizados diversos estudos de curtíssimo e curto prazo para várias usinas hidrelétricas brasileiras. Serão apresentadas algumas das análises aplicadas à usina, cuja consolidação dos dados foi apresentada no Capítulo 5. Em cada estudo, as trajetórias simuladas são comparadas às trajetórias registradas na base de dados de operação. A fim de facilitar a comparação, os gráficos dos estudos apresentados lado-a-lado possuem as mesmas escalas.

6.2 Curtíssimo Prazo

Para o curtíssimo prazo são apresentados quatro estudos de reprodução da operação hidrelétrica, cujas características são apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 Características dos estudos de curtíssimo prazo.

Estudo	Período Simulado	Dados Físicos
1	10/09/2006 a 24/09/2006	Oficiais
2	10/09/2006 a 24/09/2006	Consolidados
3	01/07/2007 a 15/07/2007	Oficiais
4	01/07/2007 a 15/07/2007	Consolidados
Tipo de Simulação: Reprodução da trajetória de <i>q</i>		

Os estudos descritos na tabela anterior compreendem o período máximo do horizonte, isto é, duas semanas. Os dois primeiros foram realizados dentro do período usado para a consolidação dos dados. Os dois últimos foram efetuados num período posterior ao utilizado na aplicação da metodologia. Na primeira e na terceira análise, o simulador utilizou os dados físicos oficiais do setor elétrico. Na segunda e na quarta, foram utilizados os dados físicos consolidados de acordo com a metodologia apresentada neste trabalho.

Uma vez que o curtíssimo prazo corresponde a um intervalo pequeno de operação, a política operativa de reprodução da trajetória de geração não apresenta resultados expressivos. Portanto, serão apresentadas apenas as análises nas quais o simulador foi utilizado com o objetivo de reproduzir a trajetória de vazão turbinada.

Para todos os gráficos desta seção o eixo das abscissas apresenta a discretização das variáveis no tempo. Os valores desse eixo equivalem ao dia simulado no estudo.

6.2.1 Estudos 1 e 2 – Internos ao Período Utilizado na Consolidação

Tanto o Estudo 1 quanto o Estudo 2 têm como objetivo reproduzir a operação da usina, no período de 10/09/2006 a 24/09/2006, utilizando as seguintes variáveis de operação registradas na base: volume inicial e trajetórias de geração, de vazão afluyente e de vazão vertida, conforme a Figura 6.1. O Estudo 1 utiliza os dados físicos oficiais, enquanto o Estudo 2 emprega os dados físicos consolidados.

Na Figura 6.3, mostra-se uma comparação das trajetórias registradas e simuladas para os Estudos 1 e 2. São apresentados os gráficos de geração, nível de jusante, vazão turbinada e nível de montante. Uma vez que não houve vertimento no período, o gráfico correspondente a essa variável foi omitido.

Observando as trajetórias apresentadas na Figura 6.3 para o Estudo 1, à esquerda, nota-se que a meta de geração não foi cumprida pelo simulador em alguns horários dos dias 21 e 23. Percebe-se também, que a trajetória do nível de jusante simulada é mais alta do que a registrada. A partir daí, para o Estudo 1, conclui-se que a queda bruta calculada pelo simulador é menor do que a registrada. Isso justifica a necessidade do simulador de turbinar uma quantidade de água maior do que a utilizada na operação real. Como consequência, na

simulação o reservatório depleciona e atinge, por duas vezes, o limite mínimo de 342,20 m. Nesses momentos ocorrem quedas bruscas no valor de vazão turbinada, o que implica também em quedas de nível de jusante e de geração.

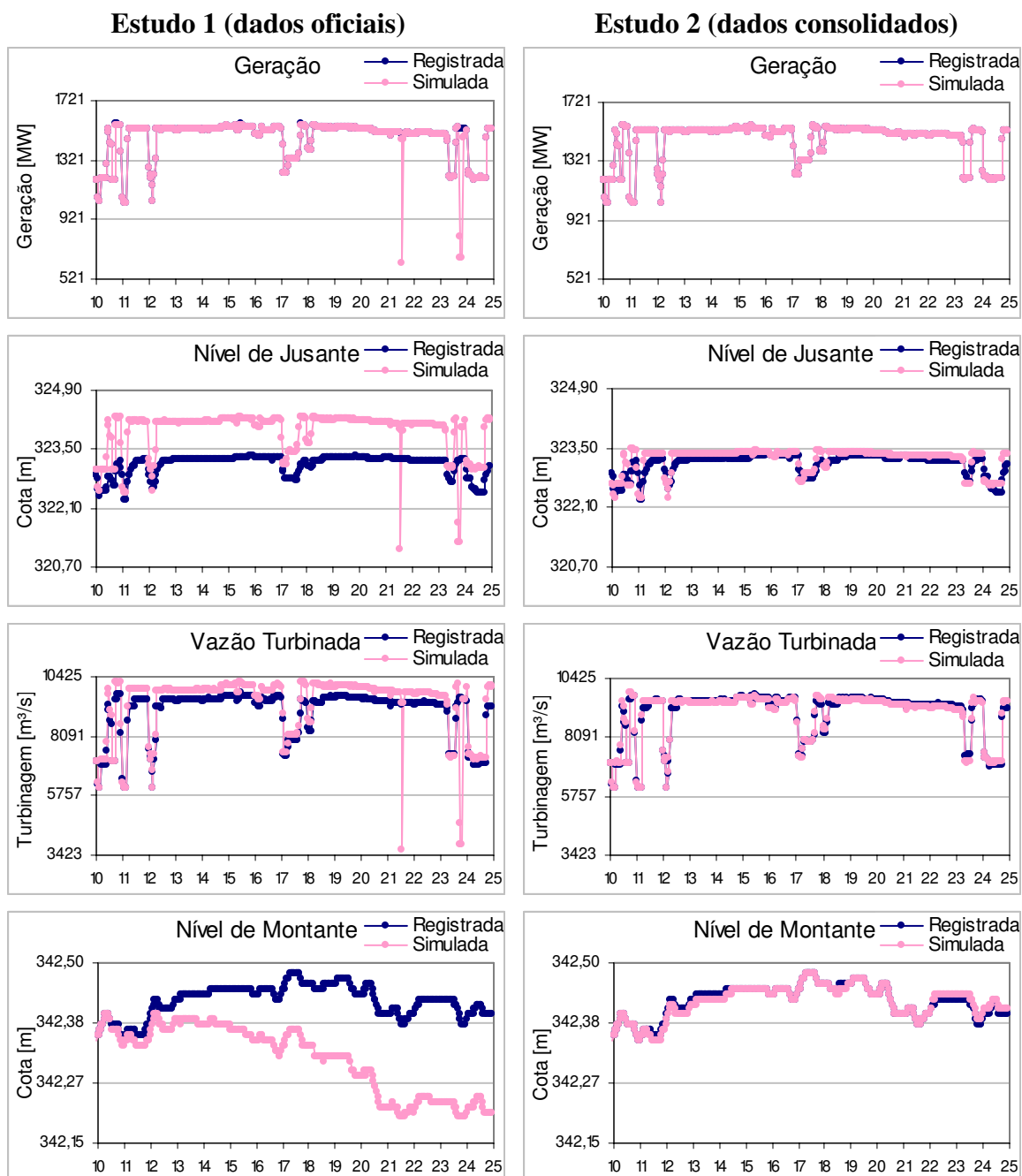


Figura 6.3 Trajetórias registradas e simuladas para os Estudos 1 e 2 do curtíssimo prazo.

Para explicar a diferença entre as trajetórias de nível de jusante do Estudo 1, deve-se lembrar que a trajetória simulada desse estudo utiliza o polinômio cota de jusante x

defluência oficial que, conforme ilustrado na Figura 6.4, tem sua trajetória acima da nuvem de pontos registrados na base de dados. No entanto, a trajetória registrada reflete os níveis de jusante medidos durante a operação da usina.

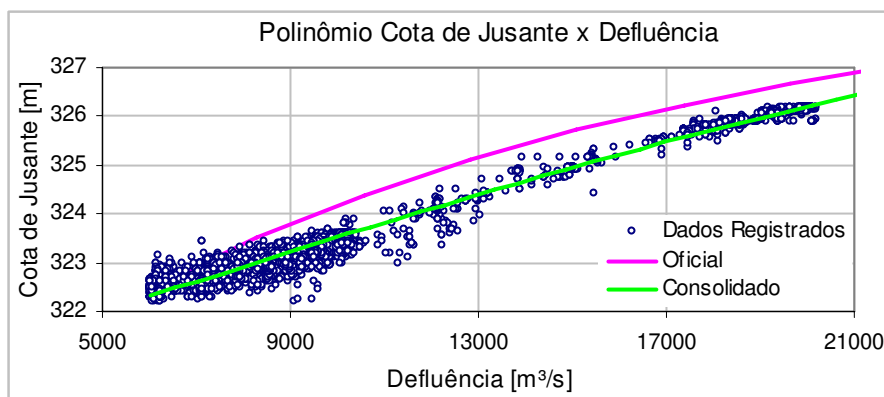


Figura 6.4 Detalhes da Figura 5.16 para a área do gráfico que apresenta os registros de operação.

Em relação ao Estudo 2, apresentado à direita da Figura 6.3, nota-se que a meta de geração foi perfeitamente cumprida pelo simulador em todo o período. Percebe-se também, que as trajetórias simuladas e registradas do nível de jusante, da vazão turbinada e do nível de montante para esse estudo são bastante próximas.

Para compreender a forte aderência entre os dados de operação e sua reprodução via simulação, no Estudo 2, deve-se ter em mente a metodologia de consolidados dos dados. Das seis funções consistidas, o polinômio cota de jusante x defluência e a função de rendimento global da usina exercem a maior influencia no resultado da simulação. Isso pode ser observado nas Figuras 6.5, 6.6 e 6.7.

Nessas figuras, apresentam-se as trajetórias de nível de montante registradas e simuladas para três situações. Na primeira, o simulador usou dados físicos oficiais. Na segunda situação, o simulador usou o polinômio cota de jusante x defluência consolidado. Na terceira, além do polinômio cota de jusante x defluência, o simulador usou a função de rendimento global consolidada. O objetivo é avaliar o resultado da simulação do Estudo 2 em relação à função consistida.

Optou-se por apresentar apenas a trajetória de armazenamento porque, na simulação que tem como objetivo a reprodução da vazão turbinada, ela reflete os erros das demais trajetórias simuladas.

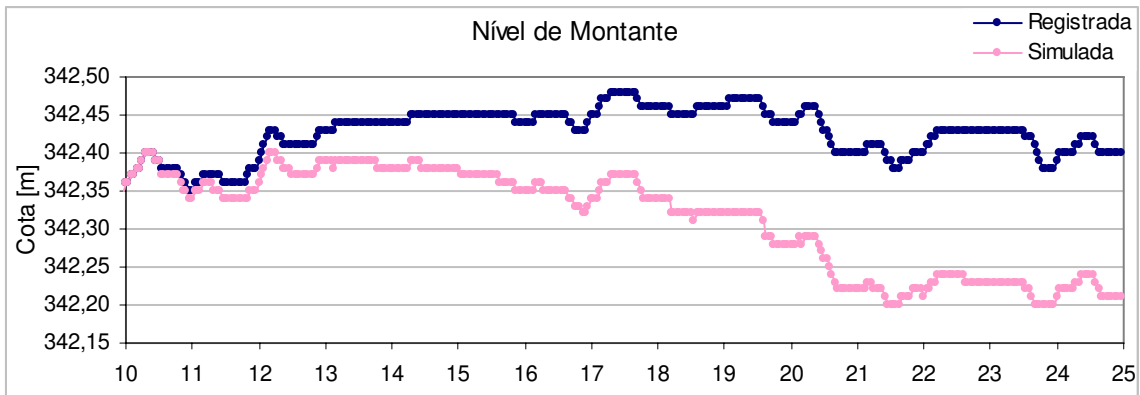


Figura 6.5 Trajetória de armazenamento registrada e simulada usando dados físicos oficiais.

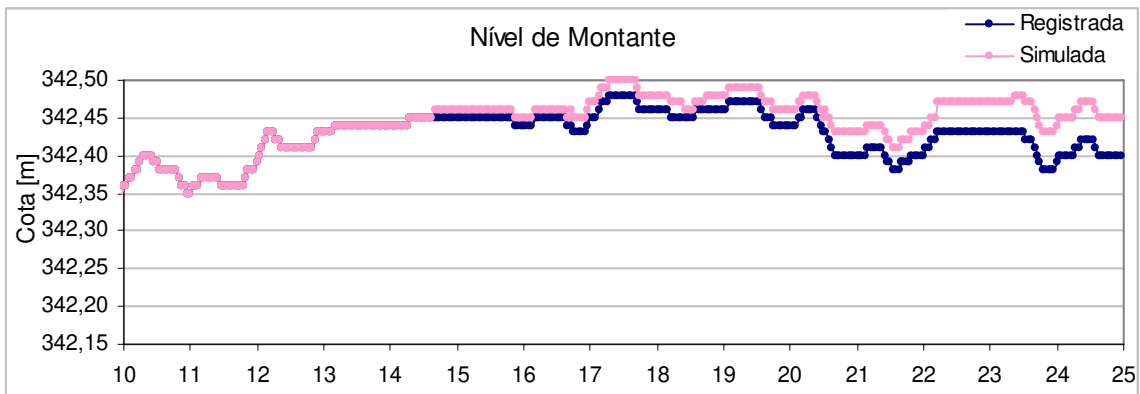


Figura 6.6 Trajetória de armazenamento registrada e simulada usando o polinômio cota de jusante x defluência consolidado.

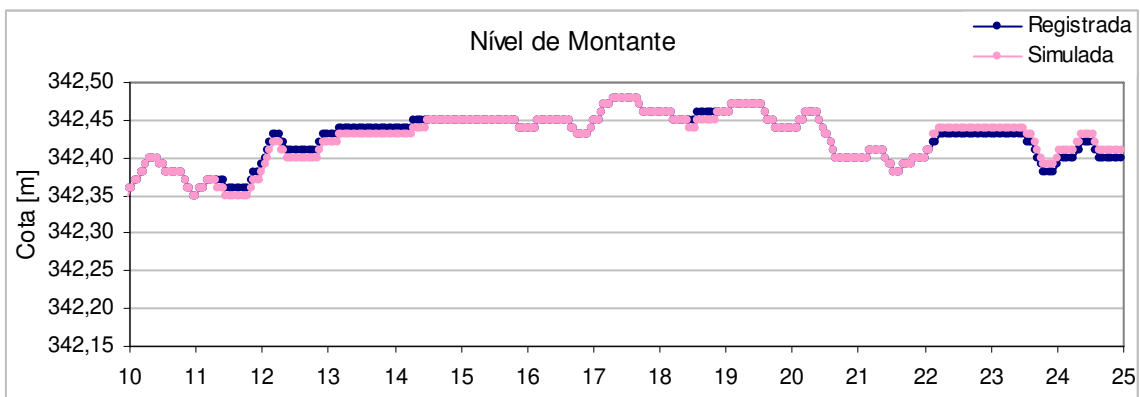


Figura 6.7 Trajetória de armazenamento registrada e simulada usando o polinômio cota de jusante x defluência e a função de rendimento global consolidados.

Ao comparar as Figuras 6.5 e 6.6, conclui-se que a utilização do polinômio cota de jusante x defluência consolidado contribui efetivamente para aproximar as trajetórias de nível de montante simulada e registrada. Isso ocorre porque diminui-se o erro no cálculo da queda bruta. Além disso, a utilização do rendimento global variável consolidado colabora para eliminar outras inconsistências entre dados físicos e variáveis registradas como, por exemplo, as inconsistências no rendimento das máquinas e nas perdas do circuito hidráulico. Dessa forma, a trajetória de armazenamento simulada aproxima-se, ainda mais, da registrada, como pode ser observado na Figura 6.7.

6.2.2 Estudos 3 e 4 - Posteriores ao Período Utilizado na Consolidação

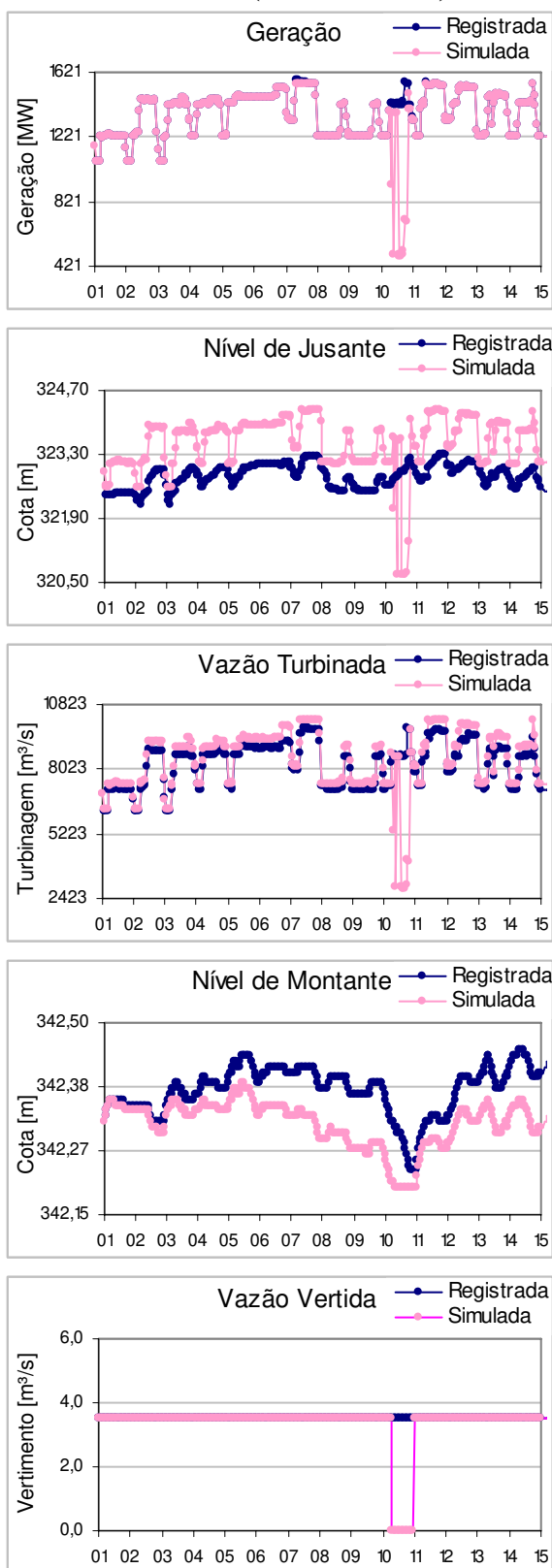
Os Estudos 3 e 4 têm como objetivo reproduzir a operação da usina no período de 01/07/2007 a 15/07/2007, ou seja, num período posterior ao utilizado na aplicação da metodologia. Ambos utilizam como dados de entrada as mesmas variáveis de operação dos Estudos 1 e 2: o volume inicial e as trajetórias de geração, de vazão afluentes e de vazão vertida. O Estudo 3 utiliza os dados físicos oficiais, enquanto o Estudo 4 emprega os dados físicos consolidados.

Na Figura 6.8, mostra-se uma comparação das trajetórias registradas e simuladas para os Estudos 3 e 4. Para eles, além dos gráficos de geração, nível de jusante, vazão turbinada e nível de montante é apresentada a trajetória de vertimento.

Observando a Figura 6.8, nota-se que os resultados apresentados pelos Estudos 3 e 4 são similares aos exibidos pelos Estudos 1 e 2, respectivamente. A principal diferença entre eles é que no período simulado pelos Estudos 3 e 4 houve vertimento. Portanto, no Estudo 3, quando o reservatório atingiu o limite mínimo de 342,20 m, além das quedas bruscas no valor de vazão turbinada e como consequência, no nível de jusante e de geração, o simulador interrompeu o vertimento.

As razões que justificam as diferenças entre as trajetórias simuladas e registradas no Estudo 3 são as mesmas das apresentadas para o Estudo 1. Da mesma forma, os motivos que explicam as aproximações entre as trajetórias do Estudo 4 são as mesmas descritas para o Estudo 2.

Estudo 3 (dados oficiais)



Estudo 4 (dados consolidados)

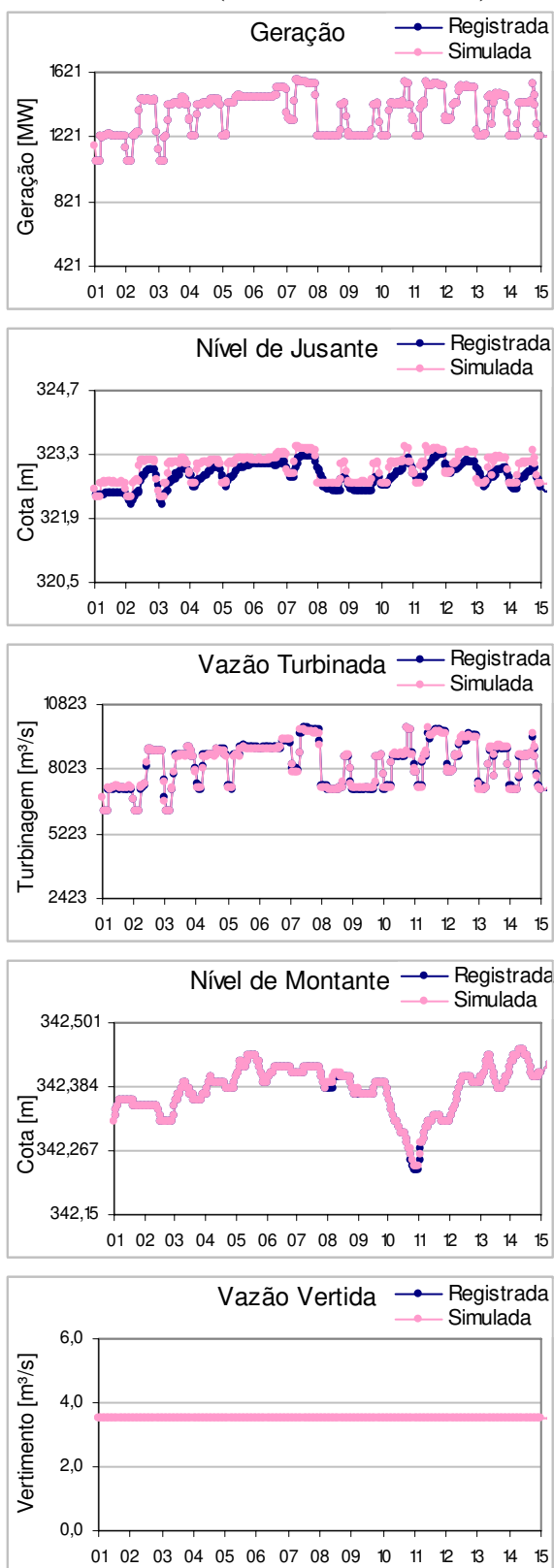


Figura 6.8 Trajetórias registradas e simuladas para os Estudos 3 e 4 do curtíssimo prazo.

Com o objetivo de mostrar uma análise numérica dos resultados obtidos nos estudos desta seção, na Tabela 6.2, apresenta-se um resumo estatístico focado na soma e na média do erro quadrático entre as variáveis registradas e simuladas para os Estudos 1, 2, 3 e 4.

A primeira coluna apresenta as variáveis analisadas. A segunda, terceira, quinta e sexta mostram a soma e a média do erro quadrático entre variáveis registradas e simuladas para os Estudos 1, 2, 3 e 4 respectivamente. A quarta coluna revela a redução do erro das variáveis do Estudo 2 em relação ao Estudo 1. A sétima coluna aponta a redução do erro das variáveis do Estudo 4 em relação ao Estudo 3.

Na sétima linha da tabela é apresentada a redução média da soma do erro quadrático entre as variáveis registradas e simuladas para a quarta e sétima coluna. O objetivo é estimar a redução dos erros conseguida após a aplicação da metodologia de consolidação de dados.

Tabela 6.2 Análise estatística dos estudos de curtíssimo prazo.

Variável	Estudo 1	Estudo 2	Redução (1-2)	Estudo 3	Estudo 4	Redução (3-4)
Soma do erro quadrático entre variáveis registradas e simuladas						
$\Theta(u)$	278,07	9,80	96,48 %	273,67	37,32	86,36 %
q	182.748.311,31	4.173.573,54	97,72 %	315.781.740,79	5.245.683,31	98,34 %
$\Theta(x)$	6,04	0,02	99,67 %	1,87	0,06	96,79 %
v	-	-	-	208,25	0	100,00 %
Redução média da soma do erro quadrático			97,96 %	-	-	95,37 %
Média do erro quadrático entre variáveis registradas e simuladas						
$\Theta(u)$	0,77	0,03	-	0,76	0,22	-
q	506.228,01	11.561,15	-	874.741,66	83,97	-
$\Theta(x)$	0,02	0	-	0,01	0,01	-
v	-	-	-	0,58	0	-

Os números da Tabela 6.2 evidenciam a melhoria na qualidade dos dados da usina, obtida após o processo de consolidação. A redução média da soma do erro quadrático foi de 97,96 % para o Estudo 2, realizado dentro do período usado para a consolidação dos dados. Para o Estudo 4, efetuado num período posterior ao utilizado na aplicação da metodologia, essa redução foi de 95,37 %.

Algumas pequenas diferenças apresentadas na terceira e na sexta coluna da Tabela 6.2 são explicadas pela precisão de 0,1 MW utilizada pelo simulador. As diferenças dessas

colunas, relacionadas ao nível de jusante e à vazão turbinada, justificam-se pelo fato do canal de fuga de uma usina hidrelétrica ser representado por uma nuvem de pontos, ou seja, há uma dispersão dos pontos em torno do polinômio que descreve a relação entre a cota de jusante e a vazão defluente. Acredita-se que uma técnica razoavelmente precisa de medição de vazão, reduza o espaçamento entre os pontos dessa nuvem, melhorando ainda mais os resultados.

6.3 Curto Prazo

Para o curto prazo são apresentados seis estudos de reprodução da operação hidrelétrica, os quais compreendem o tamanho máximo do horizonte, isto é, 1 ano. Todos eles iniciam em 01/09/2006 e finalizam em 31/08/2007. Os quatro primeiros meses desse período coincidem com o intervalo usado na consolidação dos dados, os demais, encontram-se fora desse período. Há vertimento no período analisado, porém o gráfico que apresenta a trajetória correspondente a essa variável não será apresentado, pois essa informação é conhecida pelo simulador. Na Tabela 6.3, apresenta-se um resumo das características dos estudos desta seção.

Tabela 6.3 Características dos estudos de curto prazo.

Estudo	Dados Físicos	Rendimento	Tipo de Simulação
1	Oficiais	Médio embutido na produtibilidade específica	Reprodução da trajetória de q
2			Reprodução da trajetória de p
3	Consolidados	Global médio	Reprodução da trajetória de q
4			Reprodução da trajetória de p
5		Global variável	Reprodução da trajetória de q
6			Reprodução da trajetória de p
Período Simulado: 01/09/2006 a 31/08/2007			

Os Estudos 1 e 2 utilizam dados físicos oficiais e o rendimento médio oficial da usina embutido na produtibilidade específica. O primeiro tem como objetivo reproduzir a trajetória de vazão turbinada e o segundo tem como meta a reprodução da trajetória de geração.

Os Estudos 3 e 4 utilizam dados consolidados e o rendimento global médio, obtido conforme a Equação 4.7. Novamente, o primeiro tem como objetivo reproduzir a trajetória de vazão turbinada e o segundo tem como meta a reprodução da trajetória de geração.

Os Estudos 5 e 6 também utilizam dados consolidados, porém o rendimento global empregado é o variável, adquirido de acordo com os procedimentos do item 4.2.6. Do mesmo modo, o primeiro tem como objetivo reproduzir a trajetória de vazão turbinada e o segundo tem como meta a reprodução da trajetória de geração.

Nesta seção, assim como na anterior, para todos os gráficos o eixo das abscissas apresenta a discretização das variáveis no tempo. Uma vez que o período é de um ano e a simulação é mensal, esse eixo possui uma escala que varia de 0 a 12.

6.3.1 Estudos 1 e 2 – Dados Oficiais

Tanto o Estudo 1 quanto o Estudo 2 têm como objetivo reproduzir a operação da usina, no período de 01/09/2006 a 31/08/2007, utilizando dados físicos oficiais e rendimento médio embutido na produtividade específica. O Estudo 1 fornece como dados de entrada ao simulador as variáveis apresentadas em negrito na Figura 6.1, ou seja, o volume inicial e as trajetórias de geração, de vazão afluente e de vazão vertida. Para o Estudo 2, são fornecidos o volume inicial e as trajetórias de vazão afluente e defluente, conforme ilustrado também em negrito na Figura 6.2.

Na Figura 6.9, mostra-se uma comparação das trajetórias registradas e simuladas para os Estudos 1 e 2. São apresentados os gráficos de rendimento, geração, nível de jusante, vazão turbinada e nível de montante.

Observando as trajetórias apresentadas à esquerda da Figura 6.9, para o Estudo 1, nota-se que os dados físicos oficiais não são coerentes com a realidade da operação, pois as trajetórias simuladas distam das registradas, com exceção dos dados de geração informados como entrada ao simulador. A informação que mais influenciou o resultado desse estudo foi o rendimento global da usina. Este valor está superestimado, portanto, o simulador cumpre a meta de geração turbinando pouca água. Isso justifica o aumento do nível de montante que atinge seu limite máximo de 344,20 m.

No Estudo 2 foram utilizados os mesmos dados físicos oficiais do Estudo 1. O objetivo do simulador, nesse estudo, era a reprodução da trajetória de geração. As trajetórias de geração registrada e simulada estão próximas. Entretanto, isso não significa que os dados de entrada são bons, pois o rendimento global superestimado foi compensado pelo erro na representação do canal de fuga.

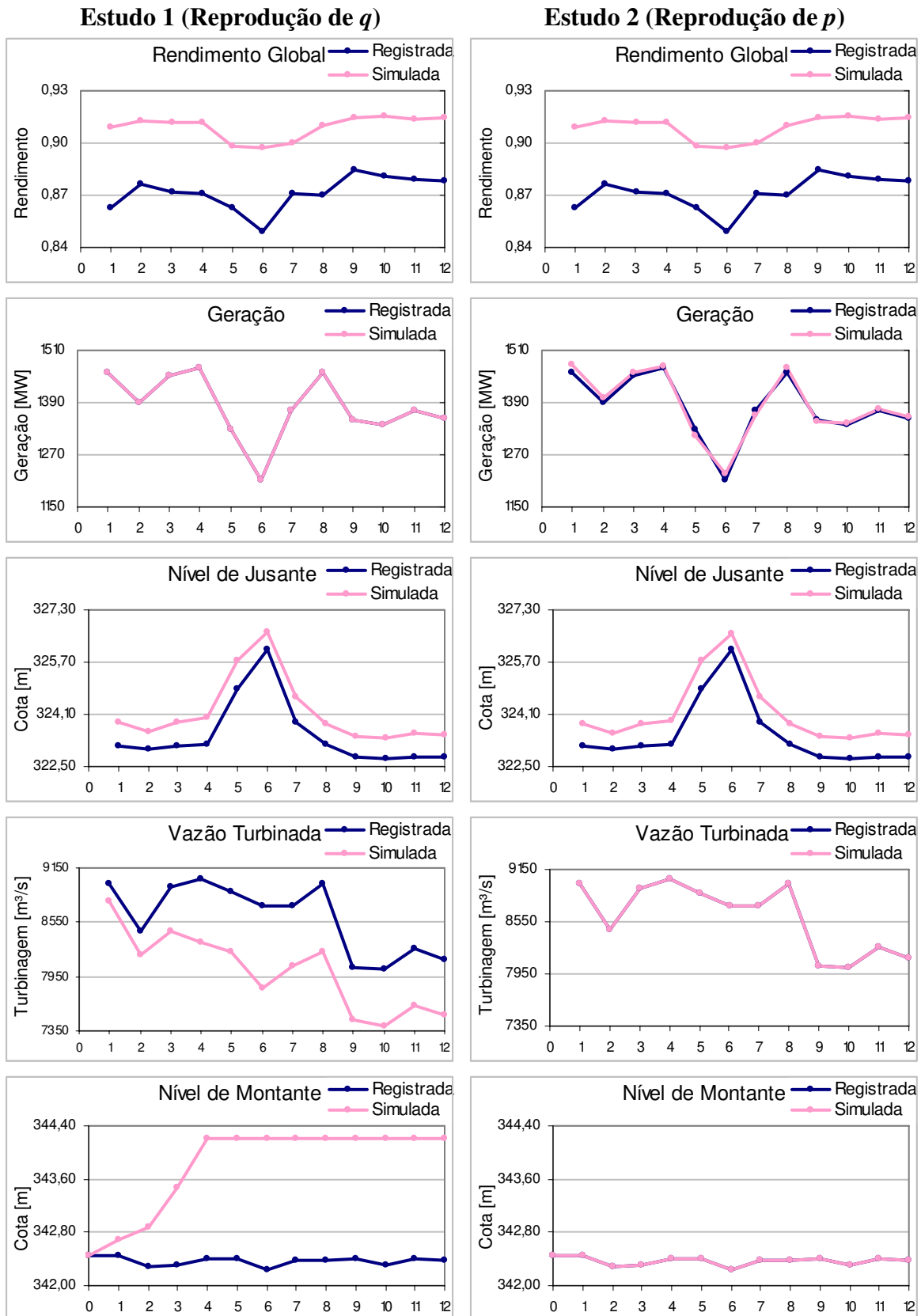


Figura 6.9 Trajetórias registradas e simuladas para os Estudos 1 e 2 do curto prazo.

Conforme afirmado anteriormente, tanto o Estudo 1 quanto o Estudo 2 utilizam o rendimento médio da usina embutido na produtividade específica. No entanto, as trajetórias de rendimento apresentadas na Figura 6.9 não são constantes. Isso acontece porque o rendimento médio da usina corresponde ao rendimento das máquinas, isto é, dos conjuntos turbina/gerador, mas não engloba as perdas associadas ao circuito hidráulico. Portanto, para esses estudos, o rendimento das máquinas é constante, porém, o rendimento global da usina é variável, pois incorpora as perdas hidráulicas, além das perdas na turbina e no gerador.

6.3.2 Estudos 3 e 4 – Dados Consolidados e Rendimento Global Médio

Os Estudos 3 e 4 têm como objetivo reproduzir a operação da usina também no período de 01/09/2006 a 31/08/2007, utilizando dados físicos consolidados e rendimento global médio. O Estudo 3 opera conforme a Figura 6.1 e o Estudo 4 atua segundo a Figura 6.2.

Na Figura 6.10, mostra-se uma comparação das trajetórias registradas e simuladas para os Estudos 3 e 4. Novamente são apresentados os gráficos de rendimento, geração, nível de jusante, vazão turbinada e nível de montante.

O Estudo 3, à esquerda da Figura 6.10, mostra alguns problemas com o resultado da simulação mesmo usando dados consolidados. Principalmente entre os períodos 4 e 7 o rendimento global simulado é mais alto que o registrado. Então, após o período 4 o simulador cumpre a meta de geração economizando água no reservatório. A partir daí, mesmo quando o rendimento global simulado é mais baixo que o registrado o simulador turbinou pouca água. Isso acontece porque, após o período 4, o nível de montante aumentou e o nível de jusante se manteve, ou seja, a queda bruta simulada tornou-se mais alta que a registrada. Por isso, mais uma vez, o reservatório atinge seu limite máximo de 344,20 m.

No Estudo 4 os mesmos dados físicos do Estudo 3 foram utilizados pelo simulador. Nesse estudo, os erros não são cumulativos em termos de variáveis hidráulicas, pois as variáveis de vazão e volume são conhecidas pelo simulador. Novamente, as trajetórias de geração registrada e simulada estão próximas. Desta vez, a proximidade entre elas indica que os dados consolidados são bons porque o rendimento utilizado é médio e não há erros significativos na representação do canal de fuga.

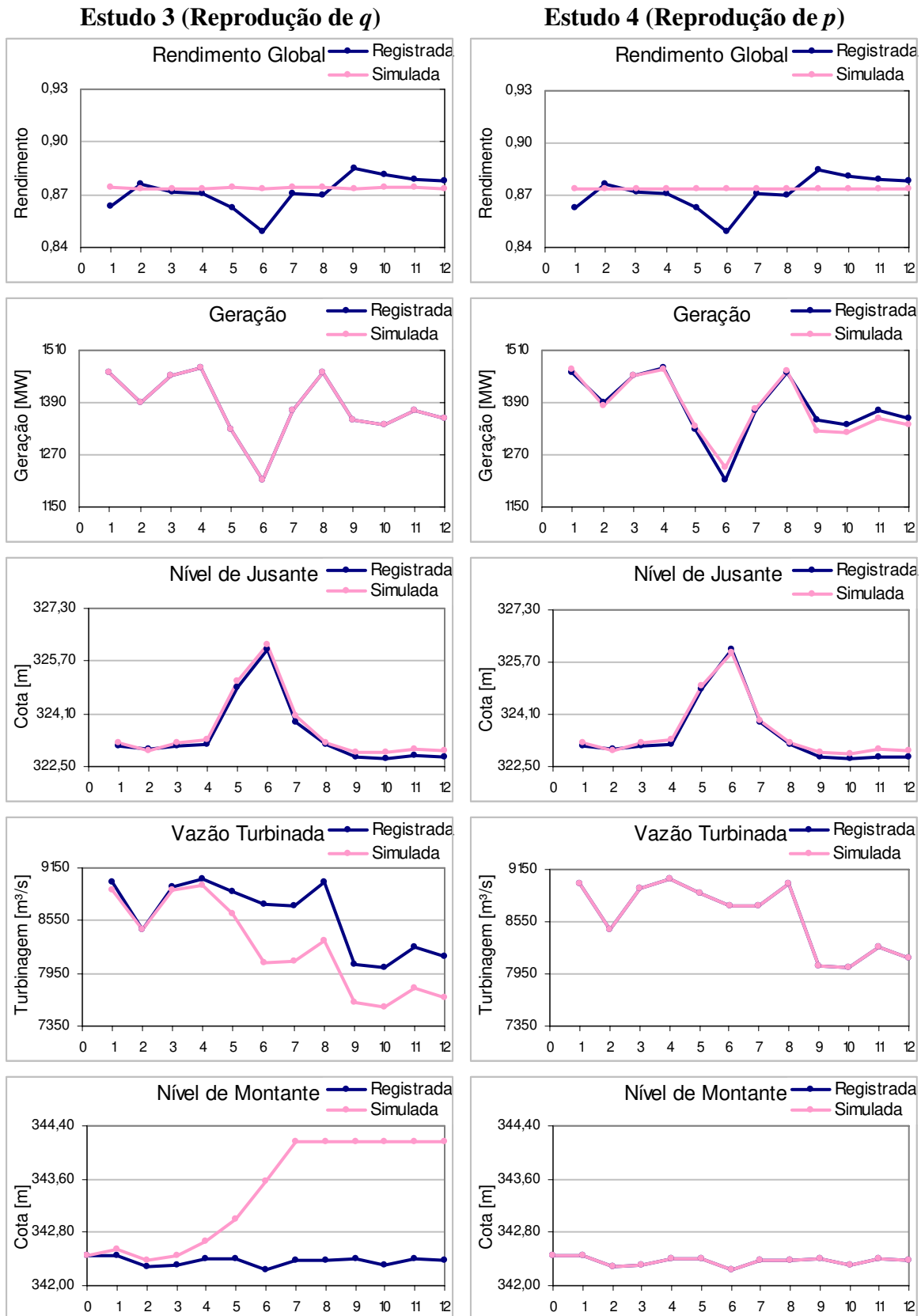


Figura 6.10 Trajetórias registradas e simuladas para os Estudos 3 e 4 do curto prazo.

6.3.3 Estudos 5 e 6 – Dados Consolidados e Rendimento Global Variável

Os Estudos 5 e 6 têm como objetivo reproduzir a operação da usina também no período de 01/09/2006 a 31/08/2007, utilizando dados físicos consolidados e rendimento global variável, obtido de acordo com os procedimentos do item 4.2.6. Mantendo o padrão dos estudos anteriores, o Estudo 5 fornece como dados de entrada ao simulador as variáveis apresentadas em negrito na Figura 6.1 e o Estudo 6 utiliza as variáveis em negrito na Figura 6.2.

Na Figura 6.11, mostra-se uma comparação das trajetórias registradas e simuladas para os Estudos 5 e 6. Novamente são apresentados os gráficos de rendimento, geração, nível de jusante, vazão turbinada e nível de montante.

Os gráficos tanto do Estudo 5, apresentado à esquerda da Figura 6.11, quanto do Estudo 6, à direita da mesma figura, mostram uma forte coerência entre os dados de operação registrados na base e sua reprodução via simulação. Para esses dois estudos, as funções que possuem maior influência no resultado da simulação, mostraram-se consistentes com a realidade física da operação. Isso pode ser observado nos gráficos que apresentam as trajetórias de rendimento global e de nível de jusante. Nota-se que, para ambos os estudos, a trajetória de rendimento global simulada acompanhou a registrada. O mesmo aconteceu para as trajetórias de nível de jusante.

No caso do Estudo 5, cujo objetivo é reproduzir a trajetória de vazão turbinada, o simulador cumpre a meta de geração turbinando praticamente a mesma quantidade de água registrada na base de dados. Dessa forma, os níveis de montante simulados e registrados mantêm-se aderentes.

Para o Estudo 6, no qual a meta é a reprodução dos valores de geração armazenados na base de dados, as trajetórias, registrada e simulada, referentes a essa variável estão bastante próximas. Além disso, comparando esse gráfico com o seu correspondente no Estudo 4, observa-se que a proximidade entre elas é ainda maior no Estudo 6 do que no Estudo 4.

Conclui-se então, que o uso do rendimento global variável é uma boa opção, não apenas para as simulações no curtíssimo prazo como também para os estudos de curto prazo.

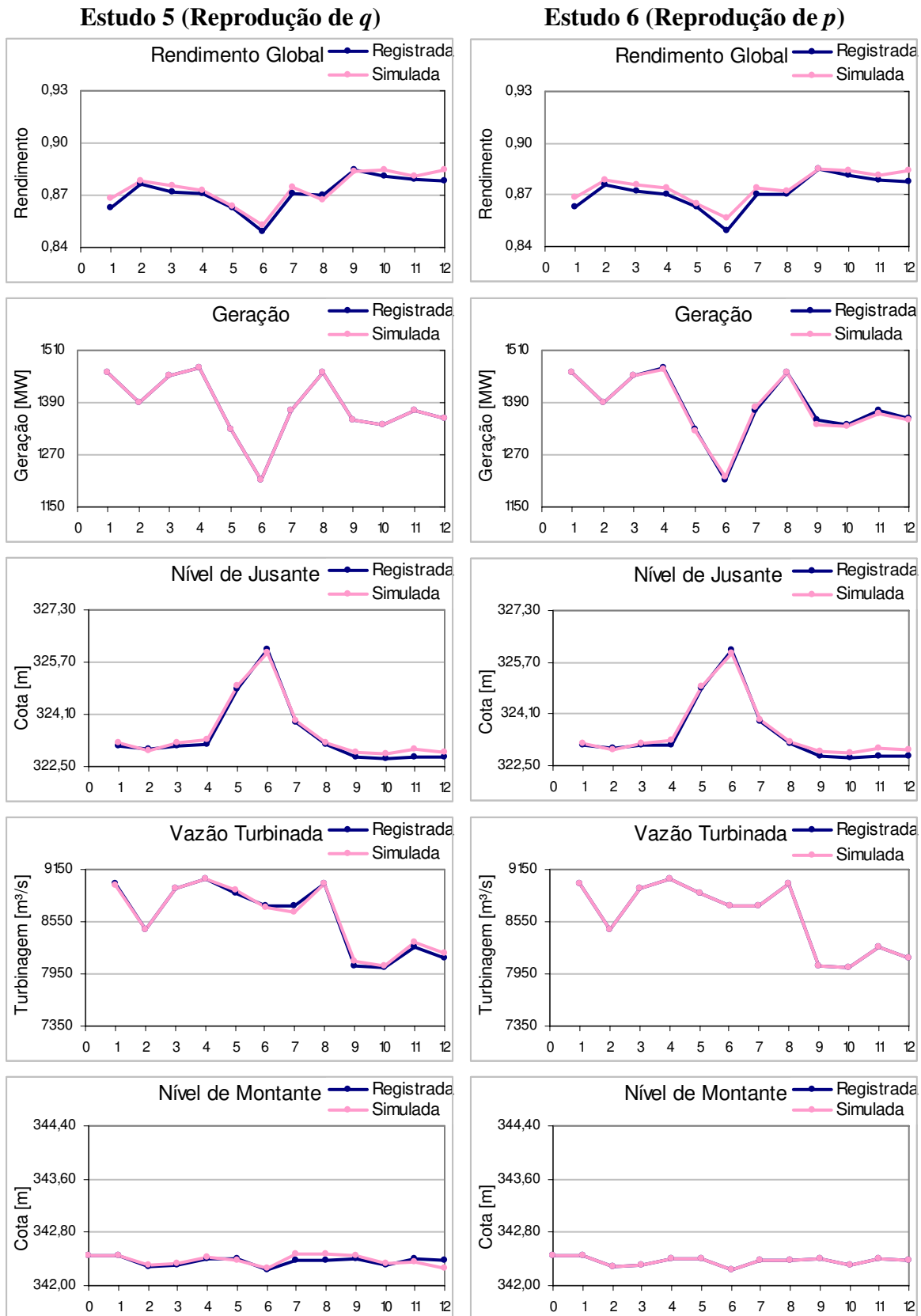


Figura 6.11 Trajetórias registradas e simuladas para os Estudos 5 e 6 do curto prazo.

A mesma análise numérica apresentada para o curtíssimo prazo foi repetida para o curto prazo. Desta vez, são apresentados apenas os resultados relacionados aos Estudos 1 e 5. Há duas justificativas para isso. A primeira é que os Estudos 2, 4 e 6 operam com um objetivo diferente dos Estudos 1, 3 e 5. A segunda justificativa, que elimina o Estudo 3, é que a utilização do rendimento global variável mostrou-se uma opção melhor do que o rendimento global médio.

Portanto, na Tabela 6.4, apresenta-se um resumo estatístico da soma e média do erro quadrático entre as variáveis registradas e simuladas para os Estudos 1 e 5. O Estudo 1 utiliza dados físicos oficiais e rendimento médio. O Estudo 5 usa dados físicos consolidados e rendimento global variável.

Tabela 6.4 Análise estatística dos estudos de curto prazo.

Variável	Estudo 1	Estudo 5	Redução do erro (1-5)
Soma do erro quadrático entre variáveis registradas e simuladas			
η^G	0,0174	0,0002	99,13 %
$\Theta(u)$	5,81	0,17	97,16 %
q	4.609.516,29	16.089,42	99,65 %
$\emptyset(x)$	32,09	0,04	99,87 %
Redução média da soma do erro quadrático			98,95 %
Média do erro quadrático entre variáveis registradas e simuladas			
η^G	0,0380	0,0035	
$\Theta(u)$	0,70	0,12	
q	619,78	36,62	
$\emptyset(x)$	1,57	0,06	

De acordo com a Tabela 6.4, a redução média da soma do erro quadrático do Estudo 5 em relação ao Estudo 1 foi de 98,95 %. Conforme mencionado anteriormente, a utilização de dados medidos de vazão turbinada pode aproximar, ainda mais, os resultados da simulação aos dados reais da operação.

Os números dessa tabela mostram que a melhoria da qualidade dos dados, obtida com a aplicação da metodologia de consolidação, beneficia não apenas os estudos de curtíssimo prazo como também os de curto prazo.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo, inicialmente é feito um breve resumo da tese com o objetivo de introduzir as conclusões finais. Na sequência, são listadas as conclusões e as observações relacionadas a este trabalho. Por fim, são apresentadas as perspectivas de desenvolvimento futuro que visam à melhoria da qualidade das informações, o aprimoramento das ferramentas utilizadas e a automatização da aplicação da metodologia de consolidação de dados.

7.1 Conclusões

Conforme mencionado no Capítulo 1, toda medida está sujeita a erros que podem ser causados pelo método de medição utilizado, por leitura incorreta do instrumento ou engano nos cálculos. Aliado a isso, as características dos dados do setor elétrico brasileiro, apresentadas no Capítulo 2, indicam a necessidade de melhorar a qualidade das informações utilizadas no planejamento e na programação da operação hidrelétrica. Com esse objetivo, este trabalho apresentou ferramentas e uma metodologia para consolidação de dados de usinas hidrelétricas.

Como ferramentas de apoio à aplicação da metodologia, no Capítulo 3, foram apresentados: o gerenciador de dados HydroData, o construtor de consultas HydroConsulta, o simulador da operação hidrelétrica HydroSim e a ferramenta Solver do Excel. Cada um desses módulos tem um objetivo específico. O HydroData permite organizar, padronizar e gerenciar dados de usinas hidrelétricas. O HydroConsulta possibilita construir, armazenar e gerenciar consultas sobre base de dados. O HydroSim pode ser usado para simular a operação futura ou reproduzir a operação passada de uma usina. A ferramenta Solver do Excel resolve problemas de otimização lineares e não-lineares.

No entanto, essas quatro ferramentas podem ser usadas para uma análise crítica da qualidade dos dados de usinas hidrelétricas. O HydroData possibilita a análise gráfica dos dados por usina. O HydroConsulta facilita a análise numérica dos dados para um sistema hidrelétrico inteiro. O HydroSim mostra a coerência entre dados físicos e dados de operação quando ele é usado para reproduzir a operação de uma usina. A ferramenta Solver do Excel pode ajustar a função de rendimento global implícita nos dados registrados de potência, queda bruta e vazão turbinada. Portanto, essas quatro ferramentas computacionais auxiliam na busca pela consistência dos dados.

A metodologia proposta no Capítulo 4, para a melhoria da qualidade dos dados, baseia-se nas informações registradas. Seu objetivo principal é a consolidação das funções que representam as características físicas da usina. A escolha dos dados físicos para o processo de consolidação é devida a influência que essas informações têm no cálculo das variáveis de operação. Ela é apresentada em duas etapas. Na primeira, analisa-se a coerência da base de dados com o objetivo de conhecer a estrutura do banco e as características das informações nele registradas. Na segunda, os registros inconsistentes

são desprezados e são consolidados: os polinômios área x cota, cota x volume e cota de jusante x defluência e as funções de potência máxima, engolimento máximo e rendimento global.

No Capítulo 5, aplica-se a metodologia aos dados de uma usina hidrelétrica que faz parte do SIN e opera sob a coordenação e controle do ONS. Foram utilizados 61.392 registros da base de dados, os quais equivalem a um intervalo de sete anos. Em relação à primeira etapa, alguns registros apresentaram inconsistências nos valores de: queda bruta, vazão vertida, nível de montante, vazão defluente, potência, vazão turbinada e rendimento global variável. Esses registros foram desprezados na etapa seguinte que ajustou as funções aos dados registrados na base.

A fim de avaliar a metodologia proposta e analisar o impacto da qualidade dos dados para os modelos de simulação da operação hidrelétrica, no Capítulo 6, foram apresentados estudos de reprodução da operação para o curtíssimo e curto prazo. Para o curtíssimo prazo, foram apresentados quatro estudos alternando dados oficiais e dados consolidados dentro e fora do período utilizado para consolidação de dados. Para o curto prazo, foram apresentados seis estudos que compreendem um período de doze meses. Os quatro primeiros meses desse período estão dentro dos sete anos utilizados na aplicação da metodologia, os demais são posteriores a esse intervalo. Para esses estudos foram alternados dados oficiais e dados consolidados usando rendimento global médio e variável.

Dos resultados obtidos pelos estudos de reprodução da operação hidrelétrica, podem-se listar as seguintes conclusões:

- A qualidade dos dados tem grande influência sobre o resultado de um modelo, principalmente no que se espera sobre a representação matemática das condições reais do comportamento do sistema modelado. Isso pode ser observado nas Figuras 6.3 e 6.8 e na primeira coluna das Figuras 6.9 e 6.11.
- Das seis funções consistidas, o polinômio cota de jusante x defluência e a função de rendimento global tiveram maior impacto no resultado dos estudos, conforme observado nas Figuras 6.5, 6.6 e 6.7. Isso acontece por três razões. A primeira razão é que o polinômio área x cota não foi utilizado nos estudos de curtíssimo prazo, pois a evaporação estava embutida na vazão afluente. A segunda é que mesmo quando o

polinômio cota x volume oficial é diferente do consolidado o simulador deve receber, como dados de entrada, informações coerentes em relação ao balanço hidráulico do reservatório, ou seja, as inconsistências relacionadas a essa função são corrigidas na base de dados antes da execução do estudo. A terceira razão é que as funções de potência máxima e engolimento máximo apenas informam os limites superiores de geração e vazão turbinada em função da queda bruta e, por isso, somente em alguns casos interferem no resultado do modelo.

- A metodologia proposta mostrou-se eficiente, pois apresentou para a usina analisada, uma redução média da soma dos erros quadráticos entre variáveis registradas e simuladas superior a 95 %, tanto para os estudos de curtíssimo prazo como para as análises de curto prazo. Essas informações encontram-se na linha 7 das Tabelas 6.2 e 6.4. Em resumo, a aplicação dos procedimentos sugeridos contribui para minimizar as divergências entre a simulação e a operação real das usinas.
- A análise dos resultados de um modelo deve ser feita cuidadosamente. Algumas vezes, os dados de entrada de um modelo possuem erros que se compensam fazendo o resultado parecer bom. Isso pode ser observado na segunda coluna da Figura 6.9. Outras vezes, os dados de entrada são razoáveis, mas a metodologia aplicada acumula erros, principalmente nas variáveis hidráulicas, que podem, em alguns casos, comprometer a qualidade da solução final, conforme ilustrado na primeira coluna da Figura 6.10.
- Nos estudos de curto prazo o uso do rendimento global médio mostrou-se uma opção relativamente boa, apresentada na segunda coluna da Figura 6.10. Porém, os melhores resultados foram obtidos quando o simulador utilizou dados consolidados e rendimento global variável. Para essa situação as trajetórias registradas e simuladas são aderentes, independente do tipo de simulação aplicada. Isso pode ser constatado na Figura 6.11.

Ressalta-se que o ajuste das funções feito com a aplicação da metodologia apresentada não é definitivo. À medida que se aprimora o controle hidráulico da usina, com melhorias nos medidores e obtenção de leituras mais precisas, é necessário rever o

processo. Além disso, é importante notificar o operador da substituição das tabelas de cálculo do balanço hidráulico do reservatório sempre que houver alterações nas funções, para que haja continuidade da melhoria dos dados no futuro. Destaca-se também, que nem todas as empresas registram campos calculados na base de dados de operação. Logo, as análises que envolvem a queda bruta, a vazão defluente e o vertimento total, apresentadas na seção 4.1.1, não se aplicam a qualquer usina hidrelétrica.

Por fim, pode-se dizer que o impacto da qualidade dos dados na reprodução da operação hidrelétrica indica que outros modelos computacionais, utilizados pelo setor elétrico para otimização, simulação e previsão de vazões podem apresentar resultados duvidosos em função das características das informações fornecidas a eles. Portanto, a busca pela melhoria da qualidade dos dados é importante para a escolha de uma política operacional econômica e confiável para o sistema elétrico brasileiro.

7.2 Trabalhos Futuros

Como sugestões de trabalhos futuros são listados cinco itens. Os dois primeiros referem-se a duas funções importantes para os modelos de simulação da operação hidrelétrica: o polinômio cota de jusante x defluência e a função de rendimento global. O terceiro e o quarto têm como objetivo aprimorar o HydroSim nos horizontes de curtíssimo e curto prazo, respectivamente. O quinto item visa à automatização da aplicação da metodologia apresentada.

- **Medição de vazões usando o ADCP:** o objetivo desse item é representar, de forma mais precisa, a variação do nível de jusante em função da vazão defluente. Para isso, sugerem-se campanhas de medição das vazões do canal de fuga utilizando-se a tecnologia ADCP.
- **Ajuste da função de rendimento global:** neste item a idéia é desenvolver uma segunda técnica de calibração da função de rendimento global. A proposta é ajustar os coeficientes de um modelo matemático que represente essa função, ou seja, fazer um ajuste de superfície, ao invés de calibrar os elementos de uma matriz.
- **Despacho individualizado de unidades geradoras:** a finalidade desse item é aprimorar o simulador de curtíssimo prazo apresentado neste trabalho. A sugestão é

permitir o despacho individualizado de unidades geradoras, isto é, possibilitar valores de geração e vazão turbinada específicos para cada máquina.

- **Importação dos dados em base mensal:** o objetivo desse item é aprimorar o simulador de curto prazo apresentado neste trabalho. A idéia é converter os dados horários da base em dados mensais, a fim de permitir a importação automática dos mesmos para o simulador da operação hidrelétrica.
- **Consolidação automática de dados:** neste item, recomenda-se a criação de um módulo, no HydroLab, específico para o controle da qualidade dos dados compartilhados por seus modelos. O objetivo é favorecer a análise de desempenho dos modelos contribuindo para a obtenção de resultados confiáveis.

Referências Bibliográficas

ANEEL, 2008. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3ª edição*. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Disponível em: www.aneel.gov.br (Página inicial » Educação / Pesquisa e Desenvolvimento » Atlas de Energia Elétrica do Brasil – 3ª edição, 2008). Acesso em: 06/07/2009.

ANEEL, 2009a. *Matriz de Energia Elétrica*. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Disponível em: www.aneel.gov.br. (Página inicial » Informações Técnicas » Banco de Informações de Geração » Capacidade Geração Brasil » Matriz de Energia Elétrica). Acesso em: 06/04/2009.

ANEEL, 2009b. *Diretrizes para a Elaboração de Serviços de Cartografia e Topografia, Relativos a Estudos e Projetos de Aproveitamentos Hidrelétricos*. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Disponível em: www.aneel.gov.br (Página inicial » Informações Técnicas » Gestão e Estudos Hidroenergéticos » Informações Gerais (Acervo Técnico) » Diretrizes de Cartografia e Topografia, 2009). Acesso em: 06/07/2009.

ARCE, A.S. *Despacho Ótimo de Unidades Geradoras em Sistemas Hidrelétricos via Heurística Baseada em Relaxação Lagrangeana e Programação Dinâmica*. Tese de Doutorado, FEEC/UNICAMP, 2006.

ARCE, A.S.; OHISHI T.; SOARES S. *Optimal Dispatch of Generating Units of the Itaipu Hydroelectric Plant*. IEEE Transactions on Power Systems, 2002.

ARCE, A.S.; CICOGNA, M.A.; SOARES, S.; OHISHI, T. *Dynamic Dispatch of Hydro Generating Units*. Proceedings of the IEEE Bologna Power Tech, Bologna, Italy, 2003.

AZEVEDO, A.T. *Métodos de Pontos Interiores Aplicados em Sistemas de Potência Modelados por Fluxo em Redes*. Tese de Doutorado, FEEC/UNICAMP, 2006.

BALLINI, R. *Previsão de Vazões Através de Sistemas Neuro-Fuzzy*. Tese de Doutorado, FEEC/UNICAMP, 2000.

BLOCH, S.C. *Excel for Engineers and Scientists*. Wiley, EUA, 2003.

BOWMAN J.S.; EMERSON S.L.; DARNOVSKY, M. *The Practical SQL Handbook – Using Structured Query Language*. Third Edition. Addison Wesley, 1996.

CANAL_ENERGIA, 2007. *CNPE define diretrizes para metodologias e softwares do setor elétrico*. Disponível em: www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Newsletter.asp?id=59066
Acesso em: 06/07/2009.

CANAL_ENERGIA, 2009. *ONS terá auditoria para dados do PMO*. Disponível em: <http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/OeM.asp?id=71567>
Acesso em: 06/07/2009.

CARVALHO, M.F.H.; SOARES, S. *An Efficient Hydrothermal Scheduling Algorithm*. IEEE Transactions on Power Systems, USA, vol. PWRS-2, pp. 537-542, 1987.

CCEE, 2009. Disponível em: www.ccee.org.br (Página inicial » Comercialização de Energia » Preços » Download Deck de Preços). Acesso em: 06/07/2009.

CEPEL, 2002. *Manual do usuário do modelo NEWAVE - versão 8.3*, julho de 2002.

CEPEL, 2006. *Manual do usuário do modelo DECOMP - versão 13.1*, março de 2006.

CICOGNA, M.A. *Modelo de Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos a Usinas Individualizadas Orientado por Objetos*. Dissertação de Mestrado, FEEC/UNICAMP, 1999.

CICOGNA, M.A. *Sistema de Suporte à Decisão para o Planejamento e a Programação da Operação de Sistemas de Energia Elétrica*. Tese de Doutorado, FEEC/UNICAMP, 2003.

CICOGNA, M.A.; SOARES, S. *Um Sistema Gerenciador de Dados Cadastrais para as Usinas Hidrelétricas Brasileiras*. In: XV SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003.

CICOGNA, M.A.; MARQUES, T.C.; SOARES, S. *Avaliação dos Benefícios Sinérgicos da Coordenação da Operação de Usinas Hidrelétricas em Cascata*. In: XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, 2005. Anais do XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2005.

CICOGNA, M.A.; LAUDANNA, P.R.; COSTA, C.A.S.; RIBEIRO, T.S.M.T.; MORIBE, C.H.; LOPES, J.E.G. *Integração das Áreas de Planejamento, Tempo Real, Manutenção e Comercial Através de um Sistema de Suporte à Decisão*. In: Encontro para Debates de Assuntos de Operação, 2007, Caldas Novas. Anais do IX EDAO - Encontro para Debates de Assuntos de Operação, 2007.

CNEC, 1983/91. Conselho Nacional de Engenheiros Consultores. Disponível em: www.cnec.com.br

DINIZ, A.L.; ESTEVES, P.P.I.; SAGASTIZÁBAL, C.A. *A Mathematical Model for the Efficiency Curves of Hydroelectric Units*. IEEE 1-4244-1298-6/2007.

DO, 2007. *Resolução no 1 publicada no Diário Oficial da União de 9 de maio 2007*. Disponível em: www.zonaeletrica.com.br/downloads/Resolucao_1_2007.pdf

DOLCE, O.; POMPEO, J.N. *Fundamentos de Matemática Elementar - V10 - Geometria Espacial*, 2005.

ELMASRI; NAVATHE *Fundamentals of Database Systems*. Third Edition. Addison Wesley, 2000.

GAMARO, P.E *Medição de Vazão com Equipamento Acústico Doppler*. Disponível em: http://www.iph.ufrgs.br/sedimentos/curso02_sintese.asp ABRH, 2006. Acesso em: 06/07/2009

HIDALGO, I.G. *Sistema de Consultas para a Análise de Dados Cadastrais de Usinas Hidrelétricas*. Dissertação de Mestrado, FEEC/UNICAMP, 2004.

HIDALGO, I.G.; SOARES, S.; FONTANE, D.G.; CICOGNA, M.A. *Management and Analysis of Data from Hydroelectric Plants*. IEEE - Power Systems Conference & Exhibition (PSCE), WA, EUA, 2009a.

HIDALGO, I.G.; FONTANE, D.G.; SOARES, S.; CICOGNA, M.A. *Computer Aided System for Managing, Controlling and Analyzing Data from Hydroelectric Plants*. ASCE - World Environmental & Water Resources Congress (EWRI), MI, EUA, 2009b.

HIDALGO, I.G.; FONTANE, D.G.; SOARES, S.; CICOGNA, M.A. *A Simulator of the Hydroelectric Plants Operation as Tool for Analyzing Data*. World Congress on Computer Science and Information Engineering (CSIE) CA, EUA, 2009c.

HIDALGO, I.G.; FONTANE, D.G.; SOARES, S.; CICOGNA, M.A.; LOPES, J.E.G. *Data Consolidation from Hydroelectric Plants*. ASCE Journal of Energy Engineering (submitted), 2009d.

HIDALGO, I.G.; SOARES, S.; FONTANE, D.G.; CICOGNA, M.A.; LOPES, J.E.G. *Impact of the Data Quality from Hydroelectric Plants in the Past Operation Analysis using a Middle Term Simulation Tool*. ASCE Journal of Energy Engineering (submitted), 2009e.

HOLLINGWORTH, J.; et al. *C++ Builder 5 Developer's Guide*. Sams Publishing, 2001.

HORSTMANN, C.S. *Practical Object-Oriented Development in C++ and Java*. John Wiley e Sons, 1997.

JOSUTTIS, N.M. *The C++ Standard Library – A Tutorial and Reference*. Addison Wesley, 1999.

KEMENES, A. *Estimativa da Emissão de Gases de Efeito Estufa pela Hidrelétrica de Balbina*. Tese de Doutorado, INPA - Manaus, 2006.

LOPES, J.E.G. *Otimização de Sistemas Hidroenergéticos*. Dissertação de mestrado, EP/USP, 2001.

LOPES, J.E.G. *A Relevância dos Modelos de Otimização e Simulação do Sistema Hidrelétrico Brasileiro*. In: Ildo Luís Sauer. (Org.). *A Reconstrução do Setor Elétrico Brasileiro*. São Paulo: Paz e Terra, p. 289-300, 2003.

LOPES, J.E.G. *Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Produção de Energia Elétrica*. Tese de doutorado, EP/USP, 2007.

MME, 2008. *Consumo Final Energético por Setor*. Ministério de Minas e Energia – MME. Disponível em: www.mme.gov.br (Página inicial » Publicações » Balanço Energético Nacional » BEN » BEN 2008 » Consumo Final por Setor). Acesso em: 06/07/2009.

NWS, 2002. National Weather Service – National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em: <http://www.nws.noaa.gov>

OLIVEIRA, G.G.; SOARES, S. *A Second-Order Network Flow Algorithm for Hydrothermal Scheduling*. IEEE Transactions on Power Systems, USA, vol. 10, n. 3, pp.1635-1641, 1995.

OLIVEIRA, L.C.K.; CANELLAS, A.V.B. *Importância de Dados Hidrometeorológicos Confiáveis no Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Simpósio de Gestão de Recursos Hídricos de Gramado, RS, 1999.

OLIVEIRA, A.; NEPOMUCENO, L.; SOARES, S. *Optimal Active Power Dispatch Combining Network Flow and Interior Point Approaches*. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 4, nov. 2003.

ONS, 2004. *Evaporações Líquidas nas Usinas Hidrelétricas*. Operador Nacional do Setor Elétrico – ONS. Disponível em: www.ons.org.br (Página Inicial » Avaliação de Curto Prazo da Operação » Diretrizes para a Operação Eletroenergética » Hidrologia » Avaliação de Evaporações nos Reservatórios). Acesso em: 06/07/2009.

ONS, 2007a. *Operação do Sistema Interligado Nacional – Dados Relevantes 2007*. Operador Nacional do Setor Elétrico – ONS. Disponível em: www.ons.org.br (Página inicial » Conheça o Sistema » Dados Técnicos do SIN » Operação de SIN – Dados Relevantes » Dados Relevantes 2007). Acesso em: 06/07/2009.

ONS, 2007b. *Atualização de Dados Técnicos de Aproveitamentos Hidroelétricos*. Operador Nacional do Setor Elétrico – ONS. Disponível em: www.ons.org.br (Página inicial » Procedimentos de Rede » 9 - Recursos Hídricos e Meteorologia » 9.7 – Atualização de Dados Técnicos dos Aproveitamentos Hidroelétricos, 2007). Acesso em: 06/07/2009.

ONS, 2008. *Programação Diária da Operação Eletroenergética*. Operador Nacional do Setor Elétrico – ONS. Disponível em: www.ons.org.br (Página inicial » Procedimentos de Rede » 8 – Programação Diária da Operação Eletroenergética). Acesso em: 06/07/2009.

PEREIRA, M.V.F. *Optimal Scheduling of Hydrothermal Systems - An Overview*, IFAC Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems, Rio de Janeiro, 1985.

PEREIRA, M.V.F. *Optimal Stochastic Operations of Large Hydroelectric Systems*, Electrical Power & Energy Systems, Vol.11, n.3, 161-169, July, 1989.

PEREIRA, M.V.F.; PINTO, L.M.V.G. *Stochastic Optimization of a Multireservoir Hydroelectric System: A Decomposition Approach*, Water Resources Research, Vol. 21, n.6, 779-792, June, 1985.

RODRIGUES, M.S. *Controle de Qualidade on-line de Dados Hidrológicos Teletransmitidos* Dissertação de mestrado, UFI/MG, 2002.

RODRIGUES, M.A.M.; MACEIRA, M.E.P.; ROSS, R.P.D.; KOPILER, A., TITO, F.L.; HENRIQUES, L.A.C; CASTRO, A.; ARAÚJO, A.C.P.; ZARUR, P.D.; MELLO, J.C.O.; ANDRADES, D.B. *Sistema de Encadeamento de Modelos Energéticos* XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, SP, 2001.

SOLVER, 2009. *Frontline Systems, Inc.* Disponível em: www.solver.com. Acesso em: 06/07/2009.

TAYLOR, J.R. *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. University Science Books. p. 94, §4.1. ISBN 093570275X, 1999.

ZAMBON, R.C. *Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Grande Porte*. Tese de Doutorado. EP/USP, 2008.